

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки Ядерные физика и технологии
Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы	
Разработка спектрометра фотонного излучения на основе pin-фотодиода	
УДК 539.1.075:621.384.8:539.122.16:621.383.52	

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM74	Тимошенко Евгений Аркадьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ	Яковлева В. С.	Д.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Меньшикова Е. В.	к.филос.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т. С.	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Технологии радиационной безопасности	Веригин Д. А.	к.ф.-м.н.		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиоэкологии, медицинской физике и ядерной медицине.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
<i>Общекультурные компетенции</i>	
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор литературы по теме исследования. 2. Выбор и расчет принципиальной схемы спектрометра. 3. Изготовление печатной платы и сборка спектрометра. 4. Измерение и обработка спектров рентгеновского и гамма-излучений радионуклидов Am^{241}, Eu^{152}, Ba^{133}, Cd^{109}, Co^{57}. 5. Определение эффективности регистрации фотонов. 6. Оценка энергетического разрешения спектрометра.
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Принципиальная схема спектрометра</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Меньшикова Е. В.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Гоголева Т. С.</p>
<p>Иностранный язык</p>	<p>Шайкина О. И.</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>1. Детектор излучения</p>	
<p>2. Предусилитель</p>	
<p>3. Усилитель</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ	Яковлева В. С.	Д.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM74	Тимошенко Евгений Аркадьевич		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки (специальность) Ядерные физика и технологии
Уровень образования Магистратура
Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла
Период выполнения (весенний семестр 2019 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.03.2019	Обзор литературы по теме исследования	
01.04.2019	Выбор и расчет принципиальной схемы спектрометра	
25.04.2019	Изготовление печатной платы и сборка спектрометра	
05.05.2019	Измерение и обработка спектров рентгеновского и гамма-излучений радионуклидов Am^{241} , Eu^{152} , Ba^{133} , Cd^{109} , Co^{57}	
15.05.2019	Определение эффективности регистрации фотонов и оценка энергетического разрешения спектрометра	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ	Яковлева В. С.	Д.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Технологии радиационной безопасности	Веригин Д. А.	к.ф.-м.н.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0AM74	Тимошенко Евгению Аркадьевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Материальные затраты НТИ – 331 руб. Затраты по заработной плате исполнителей темы – 70079 руб. Отчисления во внебюджетные фонды – 18991 руб. Накладные расходы – 375 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Тариф на промышленную электроэнергию – 5,8 руб. за 1 кВт·ч Районный коэффициент города Томска – 1,3
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Размер страховых взносов – 30% Пониженная ставка – 27,1%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Иерархическая структура работ
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Определение ресурсоэффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Оценка конкурентоспособности технических решений
3. Матрица SWOT
4. График проведения и бюджет НТИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ
6. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Меньшикова Е. В.	к.филос.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM74	Тимошенко Евгений Аркадьевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM74	Тимошенко Евгению Аркадьевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны)	<ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (вредные вещества, освещение, шум, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующее излучение); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме	<ul style="list-style-type: none"> – требования охраны труда при работе на ПЭВМ; – правила безопасности при работе с паяльником; – радиационная безопасность; – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (причины, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т. С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM74	Тимошенко Евгений Аркадьевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 116 страниц, 26 рисунков, 28 таблиц, 24 источника, 2 приложения.

Ключевые слова: pin-фотодиод, спектрометр, детектор, фотонное излучение, эффективность регистрации, энергетическое разрешение.

Объектом исследования являются рентгеновское и низкоэнергетическое гамма-излучения.

Цель работы – разработка портативного, бюджетного спектрометра фотонного ионизирующего излучения на основе кремниевого pin-фотодиода.

В ходе выполнения работы был изготовлен прототип спектрометра, на котором произведены измерения спектров фотонного ионизирующего излучения радионуклидов Am^{241} , Eu^{152} , Ba^{133} , Cd^{109} и Co^{57} . На основе полученных данных была проведена энергетическая градуировка шкалы, определены эффективность регистрации и энергетическое разрешение спектрометра.

В результате исследования была подтверждена возможность применения pin-фотодиодов – приемников оптического излучения для детектирования рентгеновского и низкоэнергетического гамма-излучений.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word.

Оглавление

Введение.....	13
1 Детектор излучения.....	15
1.1 Полупроводниковые детекторы	15
1.1.1 Свойства полупроводников.....	15
1.1.2 Ионизация и собирание заряда	18
1.1.3 Основные типы полупроводниковых детекторов.....	20
1.1.4 Pin-фотодиод.....	21
2 Предусилитель.....	22
3 Усилитель.....	23
3.1 Фильтрация шумов	24
3.2 Усилители с формированием квазигауссного сигнала	25
4 Нарушения в работе спектрометра.....	27
5 Спектр гамма-излучения	27
6 Определение положений и площадей пиков.....	29
7 Распределение амплитуд выходных импульсов детектора	32
8 Экспериментальная часть.....	33
8.1 Расчет принципиальной схемы спектрометра	35
8.2 Измерения спектров	37
8.3 Градуировка спектрометра	42
8.3.1 Энергетическая градуировка шкалы	42
8.3.2 Эффективность регистрации.....	43
8.3.3 Энергетическое разрешение.....	50
9 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	52
9.1 Предпроектный анализ.....	53
9.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	53
9.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	53
9.1.3 SWOT-анализ.....	55
9.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	56

9.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	58
9.2 Инициация проекта.....	59
9.3 Планирование научно-исследовательской работы	62
9.3.1 Определение трудоемкости выполнения НИОКР	62
9.3.2 Разработка графика проведения научного исследования	63
9.3.3 Календарный план-график в виде диаграммы Ганта.....	65
9.4 Бюджет научно-технического исследования	66
9.4.1 Расчет материальных затрат НТИ	67
9.4.2 Затраты на спецоборудование.....	68
9.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы.....	68
9.4.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	70
9.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	71
9.4.6 Затраты на научные и производственные командировки	72
9.4.7 Контрагентные расходы	72
9.4.8 Накладные расходы.....	73
9.4.9 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	74
9.5 Реестр рисков проекта	75
9.6 Оценка сравнительной эффективности исследования.....	75
10 Социальная ответственность	79
10.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	80
10.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния на персонал	82
10.2.1 Организационные мероприятия.....	82
10.2.2 Организация рабочего места оператора ПК	82
10.2.3 Условия безопасной работы.....	85
10.2.4 Правила безопасности при работе с паяльником.....	87
10.3 Радиационная безопасность.....	88
10.4 Электробезопасность.....	92
10.5 Пожарная и взрывная безопасность.....	95

Заключение	98
Список используемых источников.....	100
Приложение А	102
Приложение Б	116

Введение

В настоящее время применение радиационных технологий в различных областях науки, промышленности и медицины ставит задачу исследования ионизирующих излучений, создаваемых естественными и искусственными источниками. Одним из таких исследований является оценка вклада излучений от различных радионуклидов в радиационный фон. Основное внимание обычно уделяется рентгеновскому и гамма-излучениям, обладающим высокой проникающей способностью. Значения энергий испускаемых квантов таких излучений являются характеристикой радиоактивного изотопа.

Для проведения анализа радионуклидного состава исследуемого объекта, необходимо применение детекторов излучения, работающих в спектрометрическом режиме. Чаще всего для этих целей используются сцинтилляционные детекторы, представляющие собой сложную систему, состоящую из сцинтиллятора – поглотителя энергии фотонов и фотоэлектронного умножителя – первичного преобразователя энергии от сцинтиллятора в поток электронов. Альтернативой им являются полупроводниковые детекторы, не требующие для работы прецизионного высоковольтного источника питания. Кроме того они характеризуются более высоким энергетическим разрешением, нечувствительностью к магнитным полям, а также имеют меньшие размеры, как самого кристалла, так и усилительной системы устройства. В данном исследовании в качестве детекторов излучения используется кремниевые pin-фотодиоды. Помимо вышеперечисленных преимуществ полупроводниковых детекторов, они имеют низкую стоимость.

Целью настоящей работы является разработка портативного, бюджетного спектрометра фотонного ионизирующего излучения на основе кремниевого pin-фотодиода.

Для реализации цели были решены следующие задачи:

1. Выбор и расчет принципиальной схемы спектрометра.
2. Изготовление печатной платы и сборка спектрометра.
3. Измерение и обработка спектров рентгеновского и гамма-излучений радионуклидов Am^{241} , Eu^{152} , Ba^{133} , Cd^{109} , Co^{57} .
4. Определение эффективности регистрации фотонов.
5. Оценка энергетического разрешения спектрометра.

1 Детектор излучения

Детектор – это часть спектрометрической системы, в которой происходит поглощение энергии излучения и ее преобразование, приводящее к появлению сигнала. Излучение от источника попадает в объем детектора, взаимодействует с чувствительной областью и теряет в нем часть или всю свою энергию. В результате поглощения энергии в объеме детектора изменяется его состояние, что приводит к появлению электрического сигнала. Этот сигнал усиливается и регистрируется в специальных устройствах (рисунок 1).



Рисунок 1 – Функциональная схема эксперимента [1]

Обычно методы регистрации излучений основаны на процессах ионизации или возбуждения атомов вещества детектора при прохождении заряженных частиц. Нейтральные частицы и электромагнитное излучение должны сначала испытать взаимодействие с веществом детектора или с примыкающим к детектору конвертером, чтобы могли образоваться заряженные частицы, вызывающие ионизацию [2].

1.1 Полупроводниковые детекторы

1.1.1 Свойства полупроводников

К полупроводникам относятся материалы, которые при комнатной температуре имеют удельное сопротивление от 10^{-5} до 10^{10} Ом·м. Наиболее часто используются кремний, арсенид галлия, селен, германий, теллур, разные оксиды, сульфиды, нитриды и карбиды [3].

Энергетические зоны в полупроводниках образуются из разрешенных электронных энергетических уровней отдельных атомов, составляющих решетку кристалла. У изолированного атома энергетические уровни дискретны, когда атомы сближаются, образуя решетку кристалла, атомные энергетические уровни расщепляются в соответствии с расстоянием между атомами, а также в соответствии с величиной и характером электрического поля, обусловленного атомными ядрами. Дискретные энергетические уровни изолированных атомов расщепляются в зоны, причем каждая из этих зон не локализована, а относится ко всему кристаллу.

Полупроводники и диэлектрики обладают тем свойством, что при абсолютном нуле температуры, когда электроны заполняют наинизшие свободные энергетические уровни, одна или несколько энергетических зон должны быть целиком заполненными. Наивысшая заполненная зона отделена от следующей более высокой зоны запрещенной зоной шириной E_g , в которой отсутствуют разрешенные уровни. На этом основана представленная на рисунке 2 схема энергетических зон, на которой показаны наивысшая заполненная (или валентная) зона и наинизшая свободная зона (или зона проводимости), разделенные запрещенной зоной E_g .

Так же как и для изолированного атома, разрешенные значения энергии тесно связаны с разрешенными значениями импульса (волнового вектора).

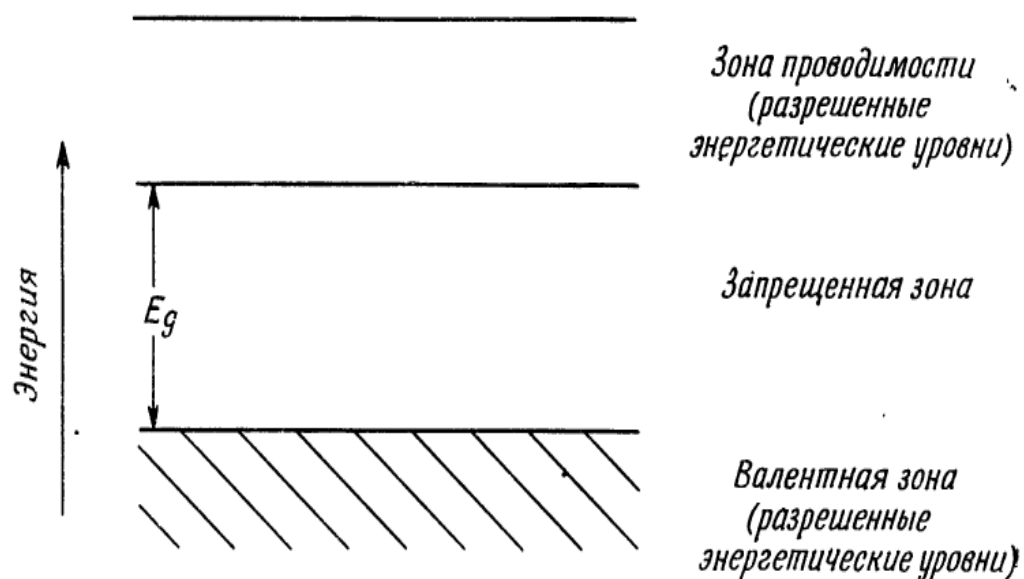


Рисунок 2 – Схема энергетических зон полупроводника

При абсолютном нуле проводимость отсутствует, так как в зоне проводимости нет электронов, а валентная зона полностью заполнена. Это означает, что любое изменение волнового вектора одного из электронов должно сопровождаться равным и противоположным по знаку изменением волнового вектора другого электрона, т. е. полный волновой вектор электронов, находящихся в заполненной зоне, всегда равен нулю. При более высоких температурах электроны могут переходить из валентной зоны в зону проводимости в результате теплового возбуждения. При равновесии эти электроны уравниваются другими электронами, падающими обратно на свободные уровни валентной зоны.

В обычных условиях, как зона проводимости, так и валентная зона заполнены частично. Поэтому при приложении к кристаллу электрического поля изменяются энергии и волновые векторы электронов в каждой зоне. Как правило, зона проводимости сравнительно мало заполнена электронами, которые движутся практически независимо друг от друга. Это означает, что валентная зона почти заполнена.

В собственных полупроводниках концентрация электронов n равна концентрации дырок p . Подвижности электронов и дырок имеют тот же

физический смысл, что и подвижности электронов и ионов, образующихся при газовом разряде, т. е. представляют собой среднюю скорость дрейфа в направлении единичного электрического поля при условии, что в среднем энергия, получаемая носителями от электрического поля, теряется вследствие процессов рассеяния в решетке кристалла.

Примеси или несовершенства структуры решетки создают локализованные энергетические уровни, которые обычно расположены в запрещенной зоне. Локализованные центры могут ионизироваться, либо отдавая электроны в зону проводимости (доноры), либо принимая электроны из валентной зоны (акцепторы). Энергия, необходимая для этого, меньше ширины запрещенной зоны E_g . При любом из этих процессов возникает только один свободный носитель заряда, поэтому равенство между концентрациями электронов и дырок нарушается. Такие полупроводники называются примесными. Концентрация свободных носителей заряда при любой температуре теперь зависит от концентрации примесей и их энергии активации.

При тепловом равновесии полупроводник характеризуется определенной концентрацией электронов и дырок, скорости которых распределяются в соответствии с температурой решетки, и в целом электрически нейтрален. Под действием света или ионизирующих частиц возникает некоторое количество неравновесных носителей, рекомбинирующих с носителями зарядов другого знака, и их концентрация экспоненциально уменьшается, стремясь к равновесному значению.

1.1.2 Ионизация и собирание заряда

Частица в кристалле полупроводника замедляется почти мгновенно (в большинстве случаев за время от 10^{-12} до 10^{-11} сек), теряя почти всю свою энергию на образование электронов с малой энергией путем ударной ионизации. Гамма-лучи теряют свою энергию иным образом. В результате фотоэффекта, эффекта Комптона или образования электронно-позитронных

пар, при взаимодействии они образуют быстрый электрон, который затем можно рассматривать как первичную бомбардирующую частицу, хотя она и не падает на поверхность детектора. В свою очередь, вторичные электроны очень быстро теряют свою энергию за счет дальнейшей ударной ионизации, пока их оставшаяся кинетическая энергия не становится слишком малой для образования электронно-дырочной пары. Эти акты ионизации можно рассматривать как упругие столкновения «бильярдных шаров», при которых сохраняются энергия и импульс. Следовательно, хотя пороговая энергия фотона, необходимая для образования электронно-дырочной пары, равна E_g (ширина запрещенной зоны), пороговая энергия ударной ионизации будет больше и обычно составляет примерно $1,5E_g$, если массы электрона и дырки одинаковы. Если они неодинаковы, то эта энергия будет значительно больше. Для кремния средняя энергия, расходуемая на образование электронно-дырочной пары, составляет 3,6 эВ, ширина запрещенной зоны кремния при комнатной температуре равна 1,15 эВ.

Сигнал, служащий для регистрации частицы и изменения ее энергии, обуславливается разделением электронно-дырочных пар около трека частицы и собиранием носителей заряда на электродах детектора. Сначала приложенное электрическое поле начинает разделять положительные и отрицательные заряды. Однако, поскольку колонка ионизации поляризуется, возникает поле пространственного заряда обратного знака, которое может полностью нейтрализовать приложенное электрическое поле в центре колонки. В таком случае около центра колонки ионизации разделение зарядов продолжается за счет обычной биполярной диффузии, а приложенное поле продолжает разделять заряды на ее краях. В конце концов, из-за диффузии диаметр колонки ионизации возрастает настолько, что в нее снова может проникнуть приложенное электрическое поле. На этой стадии процесс разделения зарядов заканчивается и начинается собирание зарядов, причем каждый носитель притягивается к соответствующему электроду полным приложенным полем [2].

1.1.3 Основные типы полупроводниковых детекторов

В настоящее время можно выделить три типа полупроводниковых детекторов, пригодных для спектрометрии ионизирующего излучения. Они отличаются по способу получения р-n-перехода, характеристикам и своему назначению.

Первый тип – поверхностно-барьерные детекторы – получают за счет создания р-n-барьера непосредственно на поверхности полупроводника, обладают очень тонким «окном» и сравнительно неширокой чувствительной областью, поэтому применяются, в основном, для спектрометрии частиц с небольшим пробегом в кремнии.

Второй тип – диффузионные р-n-детекторы, в которых р-n-переход создается в процессе диффузии соответствующих примесей в полупроводниковую пластинку р- или n-типа проводимости. Получившийся на поверхности слой иного типа проводимости является по сути дела «окном» детектора. К сожалению, эти слои значительно толще, чем у поверхностно-барьерных детекторов, однако чувствительная область таких детекторов несколько шире за счет большего удельного сопротивления кремния р-типа. Ввиду этих причин, диффузионные детекторы целесообразно использовать для спектрометрии частиц с малой удельной ионизацией, но небольших энергий.

Третий тип – диффузионно-дрейфовые р-i-n-детекторы, изготавливаются на основе, так называемой р-i-n-структуры, в которой i – область (область с собственной проводимостью), являясь высокоомной, служит чувствительной областью детектора. Ширина чувствительного слоя в таких детекторах достигает несколько миллиметров. Так же, как и у диффузионных детекторов, «окном» служит либо р- либо n-область. Такие детекторы пригодны для спектрометрии частиц с большими пробегами и фотонов [4].

1.1.4 Pin-фотодиод

Pin-фотодиод представляет собой приемник оптического излучения имеющий полупроводниковую структуру, которая включает в себя область положительных зарядов (p), область отрицательных зарядов (n) и разделяющую их нейтральную область (i), обедненную носителями заряда (рисунок 3).

Фотоны проходят в детектор через входное окно. В результате взаимодействия фотонов с чувствительной областью кристалла детектора, в ней образуются электронно-дырочные пары, число которых зависит от энергии фотонов. Под действием внешнего электрического поля пары разделяются и двигаются в обратном направлении к своим электродам, в результате чего образуется электрический ток. Полученный с детектора сигнал, затем усиливается и преобразуется по форме предварительным усилителем и усилителем-формирователем, и оцифровывается амплитудным анализатором.

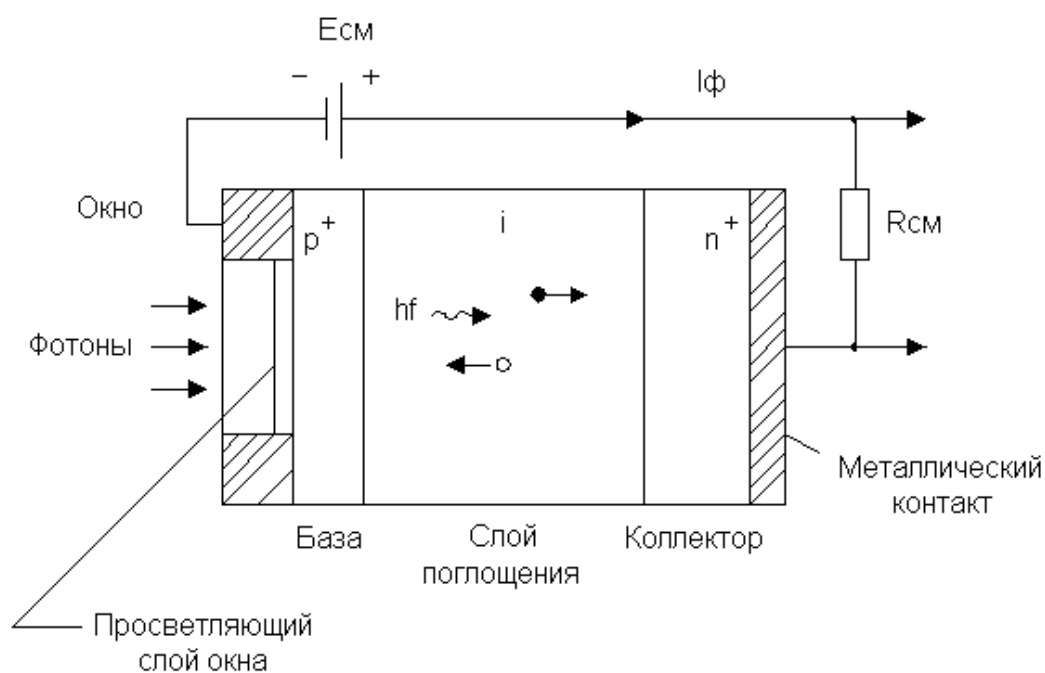


Рисунок 3 – Конструкция pin-фотодиода

Для регистрации рентгеновского и низкоэнергетического гамма-излучений возможно применение неспециализированных, бюджетных pin-

фотодиодов, предназначенных для работы в видимом и инфракрасном диапазонах фотонного излучения.

Для повышения чувствительности детектирующей системы к ионизирующему излучению на фотодиод подается обратное напряжение смещения $E_{см}$, под действием которого происходит расширение обедненной области. Это способствует образованию большего числа электронно-дырочных пар на один фотон. Кроме того, увеличение толщины чувствительного слоя снижает емкость детектора и увеличивает отношение сигнал/шум [5].

Основным требованием использования фотодиода в качестве детектора ионизирующего излучения является полное исключение светового воздействия, т.к. в противном случае фототок будет чрезмерно заливать искомый сигнал [6].

2 Предусилитель

Предусилитель преобразует импульс тока в импульс напряжения, амплитуда которого пропорциональна энергии, потерянной гамма-излучением в процессе взаимодействия с детектором. Выходной сигнал детектора обычно является коротким по времени импульсом тока с низкой амплитудой. Так у импульсных ионизационных камер и полупроводниковых детекторов она составляет от единиц до сотен микровольт [7].

Во входных цепях предусилителей обычно используют полевые транзисторы. Высокое полное входное сопротивление и практически нулевой постоянный ток затвора позволяет усиливать сигналы малой амплитуды [8].

Для того чтобы получить максимальное отношение сигнал/шум и сохранить информацию относительно энергии гамма-излучения, предусилитель следует помещать как можно ближе к детектору. Близость предусилителя минимизирует емкость на входе предусилителя, уменьшая этим уровень входного шума [7].

Германиевые детекторы гамма-квантов и кремниевые рентгеновские детекторы обычно имеют гальваническую связь (связь по постоянному току) с

предусилителями. В детекторах заряженных частиц сигнал обычно снимается через емкостную связь с электрода, к которому приложено напряжение смещения. Это позволяет заземлить один из выводов детектора. Емкостная связь также используется для детекторов с большими токами утечки [9].

3 Усилитель

Усилитель предназначен для усиления низковольтных импульсов из предусилителя до значений, требуемых для работы амплитудного анализатора, который располагается за основным усилителем. Диапазон напряжения на выходе усилителя составляет, как правило, от 0 до 10 В. Коэффициент усиления может быть установлен в широком диапазоне: от 10 до 5000.

Усиленные импульсы преобразуются по форме, чтобы оптимизировать отношение сигнал/шум и удовлетворить требованиям амплитудно-импульсного анализатора [7].

Для амплитудного анализа важно обеспечить хорошее отношение сигнал/шум, так как оно определяет энергетическое разрешение спектрометра. Так как источники шума в детекторе и первых усилительных каскадах имеют более широкую частотную полосу, чем полоса полезной информации, отношение сигнал/шум может быть улучшено соответствующей фильтрацией. Оптимальное энергетическое разрешение требует довольно длительных импульсов, однако при высоких скоростях регистрации событий для минимизации наложений импульсов, они наоборот должны быть короткими. Кроме того, нередко нужно сохранить и временную информацию, а это связано с достаточно широкой полосой пропускания. Оптимальное решение часто является результатом компромисса. Современные линейные усилители позволяют работать при нагрузках до $\sim 7000 \text{ с}^{-1}$ без ухудшения разрешения и до $\sim 90000 \text{ с}^{-1}$ с небольшим его ухудшением.

3.1 Фильтрация шумов

Простая дифференцирующая CR-цепь является фильтром высоких частот (ослабляются низкочастотные составляющие сигнала). Интегрирующая RC-цепь является фильтром низких частот (ослабляются его высокочастотные составляющие сигнала). Обычно постоянные времени дифференцирующих τ_d и интегрирующих τ_i цепей выбираются одинаковыми $\tau_d = \tau_i = \tau$. На рисунке 4 показана форма выходного сигнала после CR-RC фильтра.

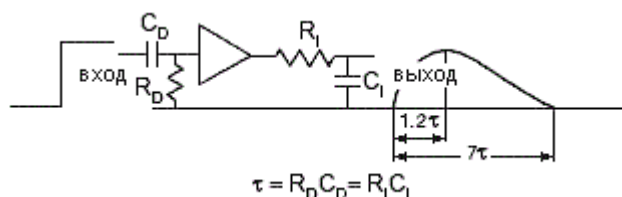


Рисунок 4 – CR-RC фильтр

Компоненты суммарного шума имеют различные спектральные распределения. Для одних спектральная плотность растет с ростом частоты, для других, наоборот, уменьшается, для третьих - постоянна. Минимальные шумы достигаются при постоянной времени CR-RC фильтра τ , когда вклады, зависящих от частоты компонентов, равны (рисунок 5).

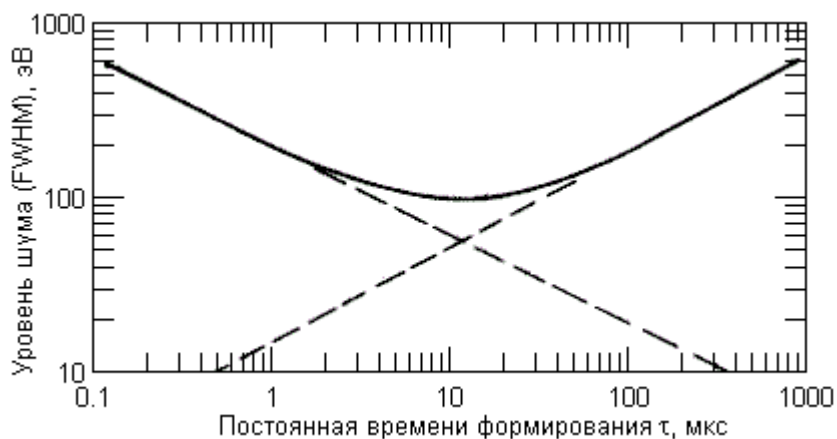


Рисунок 5 – Зависимость вклада шумов от постоянной времени усилителя

Оптимальная постоянная времени зависит от характеристик детектора, предусилителя и формирующих цепей усилителя. Для кремниевых детекторов заряженных частиц оптимальная постоянная времени 0,5-1 мкс. Для германиевых и кремниевых детекторов фотонов она заметно больше (6-20 мкс).

3.2 Усилители с формированием квазигауссового сигнала

Сигнал квазигауссовой формы можно получить однократным дифференцированием и многократным интегрированием: $CR + (RC)^n$. При увеличении количества интегрирований сигнал приобретает все более симметричную колоколообразную форму, близкую к кривой Гаусса.

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики шумовых свойств фильтров формирования квазигауссового сигнала нормированные на отношение сигнал/шум для теоретически оптимального фильтра, который имеет экспоненциальные передний и задний фронты и точечную вершину. Аналоговым формированием оптимальный фильтр не реализуется.

Таблица 1 – Относительные шумовые характеристики формирования квазигауссового сигнала

Формирующий фильтр	Форма импульса	Коэффициент увеличения отношения шум/сигнал
Теоретически оптимальный		1
Формирование квазигауссового сигнала $CR + (RC)^n$		
$n = 1$		1,36
$n = 2$		1,22
$n = 3$		1,18
$n = \infty$		1,12

В современных усилителях вместо простых CR-RC цепей используют более сложные схемы. Для интегрирования используют так называемые

активные фильтры, выполненные на операционных усилителях (рисунок 6). Использование активных фильтров позволяет сократить количество секций интегрирования.

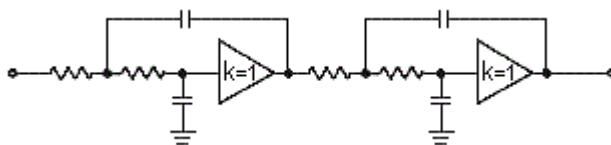


Рисунок 6 – Упрощенная схема активных интегрирующих фильтров

На рисунке 7 показана упрощенная схема усилителя с активными фильтрами.

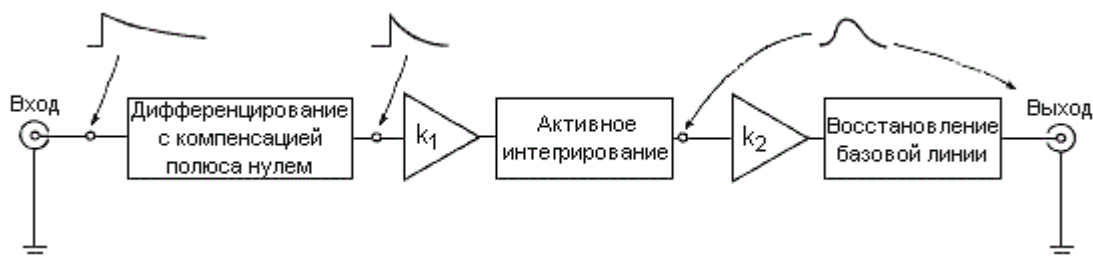


Рисунок 7 – Упрощенная схема усилителя с активными фильтрами

Хотя спектрометрические свойства усилителей с формированием однополярных сигналов квазигауссовой формы близки к оптимальным, обычно в них также предусмотрена возможность получения биполярных сигналов (рисунок 8), в частности, для получения временной информации.

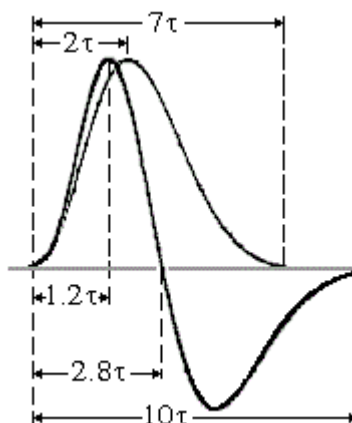


Рисунок 8 – Выходные сигналы усилителя с активными фильтрами и квазигауссным формированием [9]

4 Нарушения в работе спектрометра

В таблице 2 представлены типичные нарушения в работе спектрометра и их наиболее вероятные причины.

Таблица 2 – Нарушения в работе спектрометра и их причины

Вид нарушения	Наиболее вероятные причины
Отсутствует набор спектра	Нарушения в кабелях или способах их подключения. Отсутствие низковольтного и высоковольтного питания
Много импульсов в низкоэнергетической области (шум)	Плохое заземление. Помехи за счет источника питания. Помехи за счет монитора компьютера, расположенного вблизи спектрометра.
Увеличенное энергетическое разрешение при низком шуме	Перегрузка спектрометра по скорости счета импульсов. Не оптимальное значение постоянной формирования импульсов.
Резкое «обрезание» спектра в области больших амплитуд	Высокий коэффициент усиления усилителя.
Наличие «ложных» пиков в спектре	Помехи за счет источника питания. Плохое заземление.

5 Спектр гамма-излучения

Реалистичное представление спектра гамма-излучения моноэнергетического источника, образованного при взаимодействии с веществом детектора, представлено на рисунке 9. Буквами отмечены спектральные характеристики.

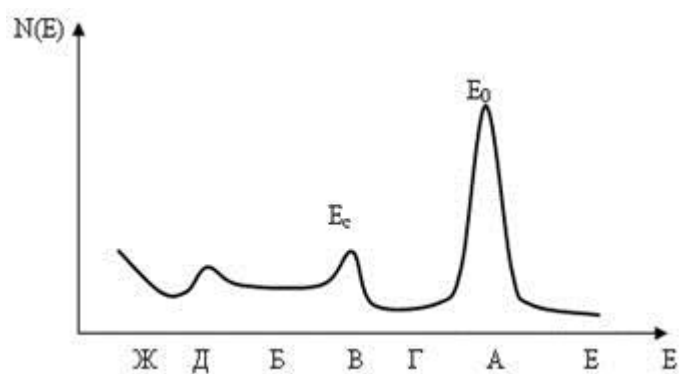


Рисунок 9 – Реалистичное представление спектра гамма-излучения моноэнергетического источника

А – пик полного поглощения (ППП), называемый также фотопиком – объединяет в себе импульсы, образованные при фотоэлектрическом поглощении гамма-квантов, а также в результате единичного и многократного комптоновского рассеяния с дальнейшим фотоэлектрическим поглощением. Ширина пика определяется статистическими флуктуациями заряда, образованного при ионизации вещества детектора, а также шумами электронных компонентов спектрометра. Центр пика соответствует энергии первичного фотона E_0 .

Б – континуум комптоновского фона – представляет собой распределение импульсов, образованных в результате однократного комптоновского рассеяния фотонов с энергией E_0 под разными углами с частичной потерей энергии в детекторе. В сложных спектрах комптоновский континуум является источником фоновых отсчетов под пиками полного поглощения.

В – комптоновский край – соответствует импульсам, образованным при максимальной потере энергии в результате комптоновского рассеяния фотона (под углом 180°). Представляет собой широкий асимметричный пик с вершиной E_c .

Г – комптоновская долина – импульсы в этой области образуются в результате многократного комптоновского рассеяния фотонов в детекторе либо в результате полной потери энергии фотонов, рассеянных на небольшие углы в

материале источника или промежуточных материалов перед попаданием в детектор. В сложных спектрах отчеты в этой области могут быть образованы в результате комптоновского рассеяния фотонов более высоких энергий.

Д – пик обратного рассеяния – образуется в результате комптоновского рассеяния фотонов в одном из материалов, окружающих детектор. Гамма-кванты, рассеянные более чем на $110-120^\circ$, будут иметь практически одинаковые энергии в диапазоне 200-250 кэВ.

Е – область избыточной энергии – наличие импульсов в этой области обусловлено попаданием в детектор гамма-квантов и мюонов космического излучения с энергией больше E_0 , а также наложением импульсов в связи с высокой скоростью счета. В сложных спектрах отчеты в этой области могут быть образованы в результате комптоновского рассеяния фотонов более высоких энергий.

Ж – подъем в области низких энергий – обусловлен наличием низкоамплитудного шума электронного оборудования, который воспринимается амплитудным анализатором как импульсы детектора. Может свидетельствовать о высокой скорости счета импульсов [7].

6 Определение положений и площадей пиков

Площадь под пиком полного поглощения можно определить как площадь под непрерывной функцией, его описывающей, а параметры этой функции оценивают подгонкой к результатам измерений на дискретном множестве точек измерений – каналов амплитудного анализатора. Для одиночных пиков подобная операция не является необходимой, площадь под ППП можно определить и другим способом. Если же требуется расшифровать мультиплет (несколько рядом расположенных пиков), форма одиночного пика должна быть описана достаточно точно и однозначно. Кроме того, к ширине канала нужно предъявить особые требования, связанные с кривизной функции описания пика в пределах канала.

Для описания формы ППП выберем функцию распределения амплитуд x импульсов детектора $U(x)$ в виде гауссиана:

$$U(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2}\right); \quad (1)$$

где σ – параметр ширины гауссиана (стандартное отклонение).

При ручном способе определения границ пика руководствуются тем, что границы пика не должны превышать фоновую часть спектра более чем на величину статистической погрешности. Для пиков, описываемых распределением Гаусса, границы пика могут быть взяты на расстоянии 3σ от центроиды пика. Это обусловлено тем, что для функции Гаусса 99,96 % площади лежит внутри области с центром x_0 , ширина которой равна 6σ . При этом $U(\pm 3\sigma) \approx 0$, а интеграл от $U(x)$ в этих пределах больше 0,99.

Возможны два способа определения площади пика и его положения. В первом предварительно вычисляется фон и анализируется оставшееся распределение, во втором область пика описывается суммой двух кривых, одна из которых относится к пику, другая к фону.

Пусть одиночный пик располагается в зоне шириной L каналов, L – четное. Пусть также справа и слева от пика в зонах шириной по $L/2$ каналов спектр образован только фоном. Очевидно, если фон представляет собой линейную функцию, то сумма отсчетов B в этих областях является оценкой фона под пиком, а среднеквадратичная оценка флуктуации – \sqrt{B} .

Тогда параметры пика и их среднеквадратичные погрешности можно оценить по формулам (суммирование по всем каналам зоны L):

1) площадь пика S_{Π} :

$$S_{\Pi} = \sum_i y_i - B; \quad (2)$$

где y_i – значение пика в i -м канале.

2) оценка погрешности площади σ_S :

$$\sigma_S = \sqrt{\sum_i y_i - B} = \sqrt{S_{\Pi} + 2B}; \quad (3)$$

3) оценка положения центра тяжести пика \bar{n} :

$$\bar{n} = \frac{1}{S_{\Pi}} \sum_i (y_i - B_i) \cdot i, \quad (4)$$

где B_i – значение фона в i -м канале, полученное путем линейной интерполяции с учетом средних значений по выбранным зонам слева и справа от пика;

4) если полагать, что

$$\sigma_{\Pi} \approx \frac{1}{S_{\Pi}} \cdot \sqrt{\sum_i (y_i - B_i) \cdot (i - \bar{i})^2}, \quad (5)$$

где \bar{i} – середина зоны пика.

Для применения второго способа необходимо выбрать функцию аппроксимации пика полного поглощения. Центральная часть и правая сторона пика хорошо описываются гауссианом практически всегда. Асимметрия проявляется обычно слева от максимума и ее можно описать двумя аддитивными функциями, называемыми «ступенькой» и «хвостом». «Ступенька» обусловлена потерей части энергии заряженных частиц за пределами чувствительного объема детектора (краевые эффекты вылета заряженных частиц). «Хвост» связан с искажениями формы линии при захвате заряженных частиц «ловушками» в чувствительной области, а для линий α -спектра – потерями энергии в слое источника.

Полную функцию распределения сигналов детектора в окрестностях пика полного поглощения, таким образом, можно представить в виде:

$$F(x) = G(x) + S(x) + D(x) + B(x), \quad (6)$$

где x – координата вдоль номеров каналов АЦП, $B(x)$ – линейная функция фона, $G(x)$ – гауссиан, $S(x)$ – «ступенька», $D(x)$ – «хвост», x_1 – точка «сшивки» двух частей хвоста.

На рисунке 10 представлен общий вид перечисленных функций в логарифмическом масштабе.

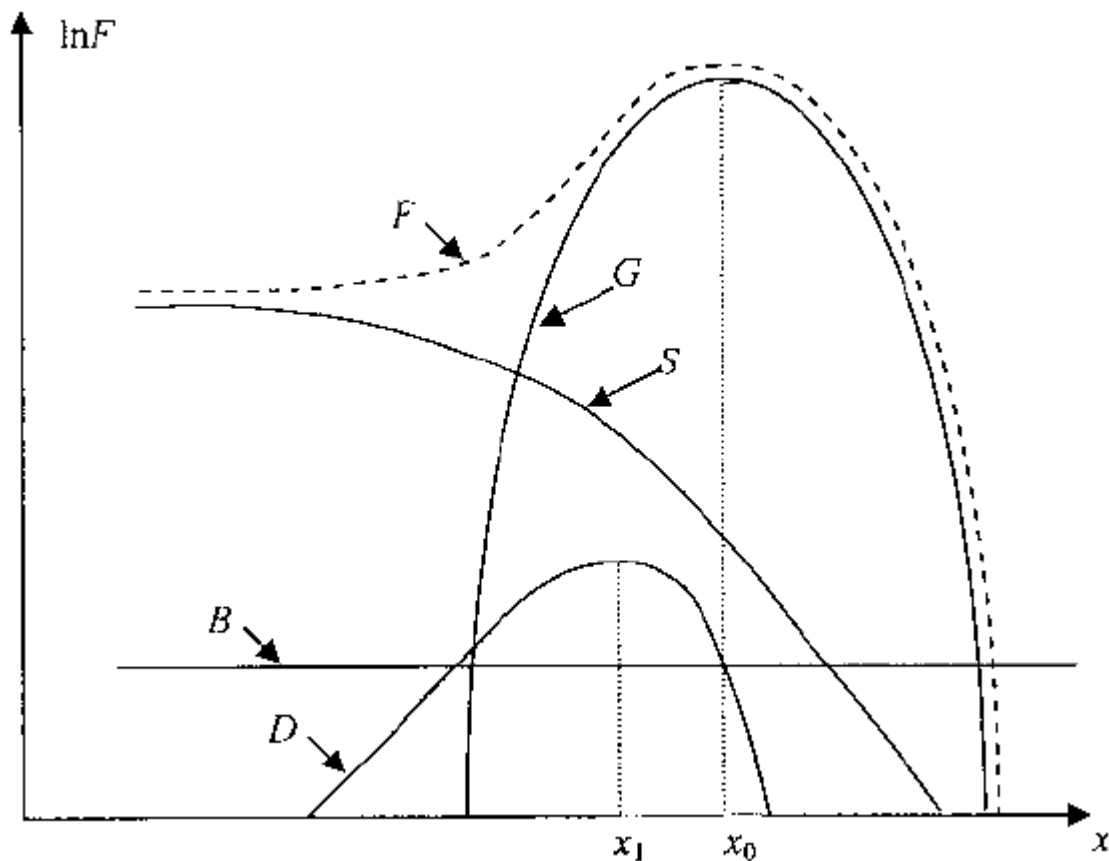


Рисунок 10 – Аппроксимация участка с пиком аналитической функцией $F(x)$

7 Распределение амплитуд выходных импульсов детектора

Распределение амплитуд импульсов на выходе детектора повторяет распределение $\psi(n_{\text{и}})$ собранных носителей информации $n_{\text{и}}$ и чаще всего аппроксимируется распределением Гаусса или близким к нему по форме распределением. Параметр ширины распределения $\sigma_{\text{п}}$ для ионизационных детекторов:

$$\sigma_{\text{п}} = \sqrt{F \cdot \frac{E}{w}}, \quad (7)$$

где w – среднее значение энергии, затрачиваемой на образование одной пары ионов, F – фактор Фано, E – энергия. Для ионизационных детекторов (ионизационная камера, полупроводниковый детектор) следует подбирать

вещество, в котором доля потерь энергии на возбуждение была бы как можно меньше. В кремниевых полупроводниках $F \approx 0,1$.

Если перевести σ_n в энергетические единицы, то:

$$\sigma_E = w \cdot \sigma_n = \sqrt{F \cdot E \cdot w}. \quad (8)$$

Обычно ширину распределения определяют на половине высоты

$$\Delta_{1/2} = 2\sqrt{2\ln(2)} \cdot \sigma_E = 2,355 \cdot \sigma_E, \quad (9)$$

$$\delta_{1/2} = \frac{\Delta_{1/2}}{E} = 2,355 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot w}{E}}. \quad (10)$$

Для полупроводниковых детекторов w составляет 3,75 эВ (кремний) и 2,94 эВ (германий). Соответственно при $E = 1$ МэВ $\Delta_{1/2} = 1,3$ кэВ, $\delta_{1/2} = 0,13$ % для кремния и $\Delta_{1/2} = 1,1$ кэВ, $\delta_{1/2} = 0,11$ % для германия.

8 Экспериментальная часть

Конструкция спектрометра представляет собой детектор, предварительный усилитель и усилитель-формирователь, размещенные на одной печатной плате, помещенной в корпус из алюминиевой трубки с входным окном из алюминиевой фольги толщиной 100 мкм (рисунок 11), который обеспечивает световое и электрическое экранирование схемы, обладающей высокой чувствительностью к электромагнитным помехам. Выход усилителя-формирователя через коаксиальный кабель соединен с входом аналого-цифрового преобразователя, подключенного к материнской плате персонального компьютера через шину PCI.

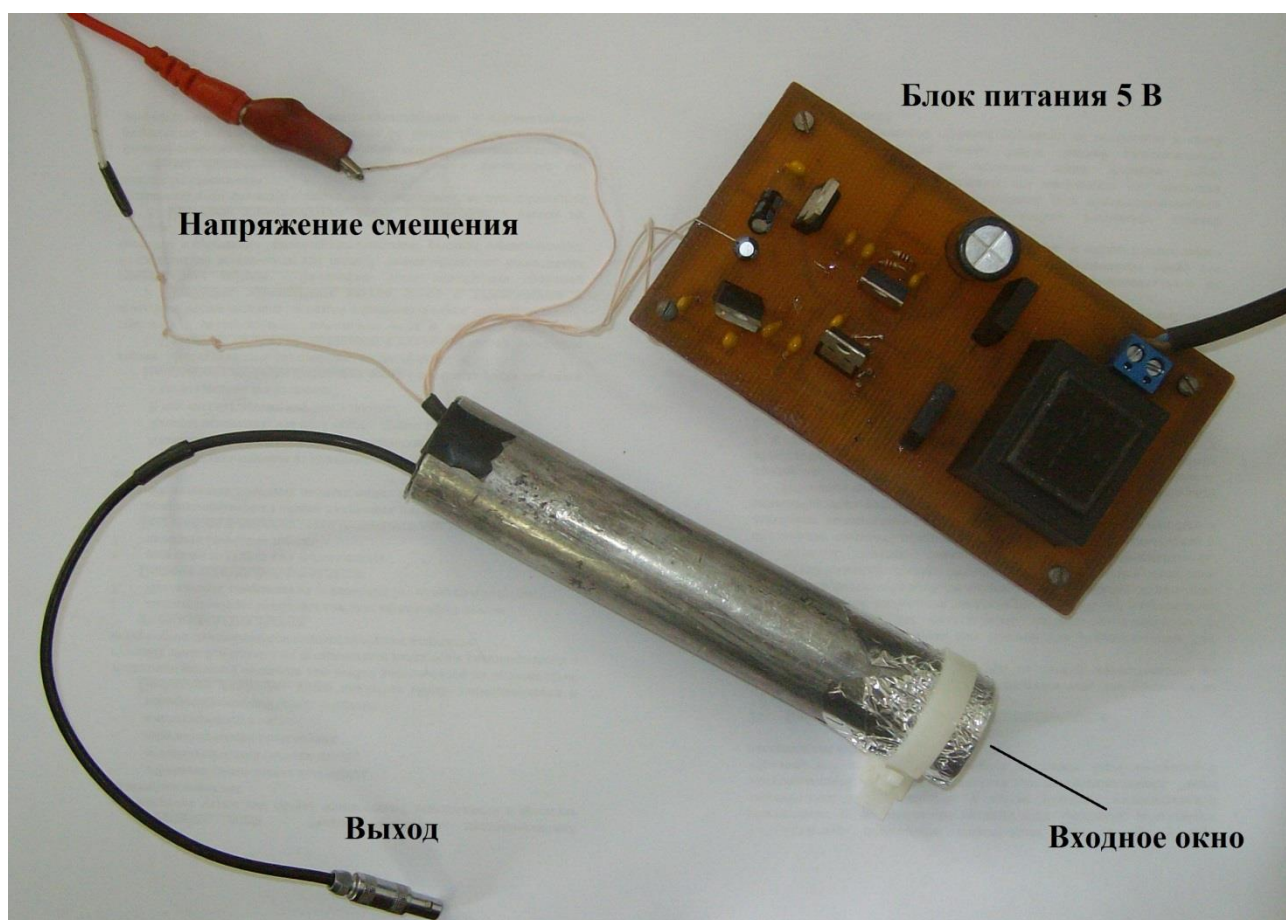


Рисунок 11 – Конструкция спектрометра

В качестве детектора ионизирующего излучения в работе использовался pin-фотодиод BPW34. Кремниевый кристалл размещен в корпусе из плексигласа с толщиной входного окна 0,7 мм (рисунок 12). Эффективная площадь детектора – 7,5 мм². Толщина чувствительной области – 210 мкм. Длина волны пиковой чувствительности типичная для кремниевого фотодиода и равна 900 нм, что соответствует инфракрасному излучению. Максимальное напряжение смещения составляет 60 В [10].

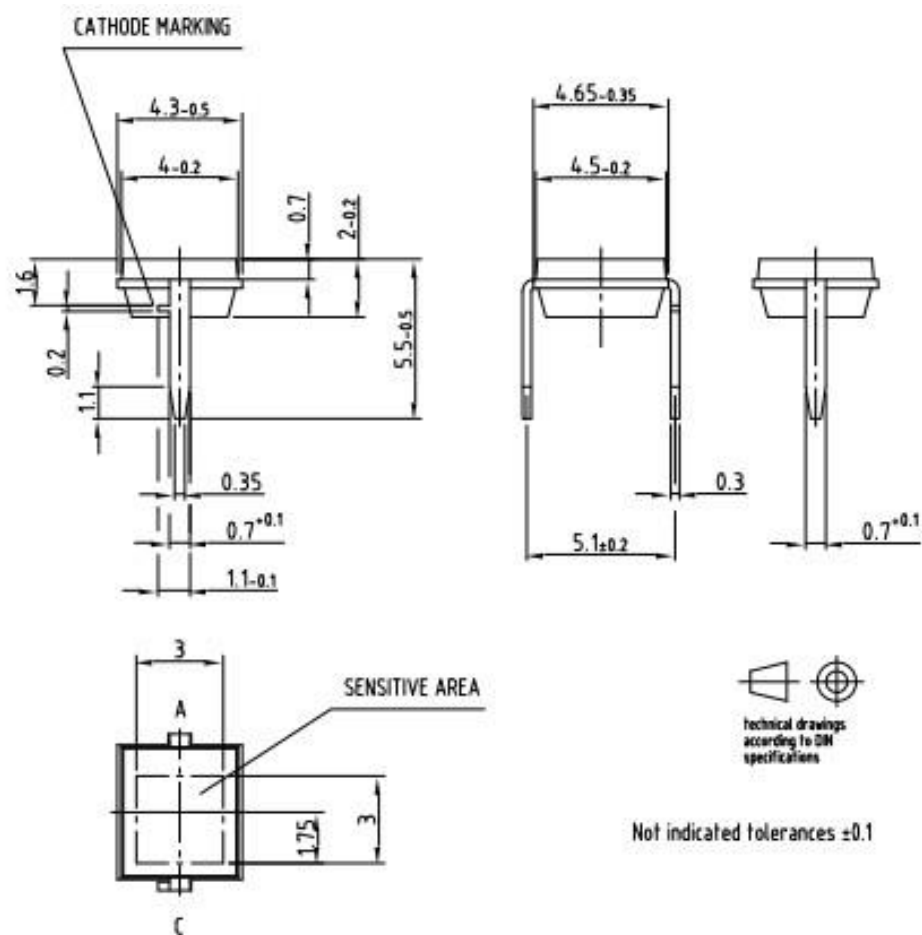


Рисунок 12 – Pin-фотодиод BPW34

8.1 Расчет принципиальной схемы спектрометра

Средняя энергия, необходимая для образования одной электронно-дырочной пары в кремниевом полупроводнике, эквивалентной элементарному заряду $Q_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, составляет $E_0 = 3,6$ эВ. При попадании в детектор кванта с энергией $E_\gamma = 59,54$ кэВ и полной потере его энергии в чувствительном объеме образуется заряд Q :

$$Q = \frac{E_\gamma}{E_0} \cdot Q_0, \quad (11)$$

$$Q = \frac{59,54 \cdot 10^3}{3,6} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 2,65 \cdot 10^{-15} \text{ Кл} = 2,65 \text{ фКл}.$$

В качестве предварительного усилителя детектора была использована схема истокового повторителя с отрицательной обратной связью [11],

построенная на полевом транзисторе с управляющим p-n-переходом 2sk152 (рисунок 13).

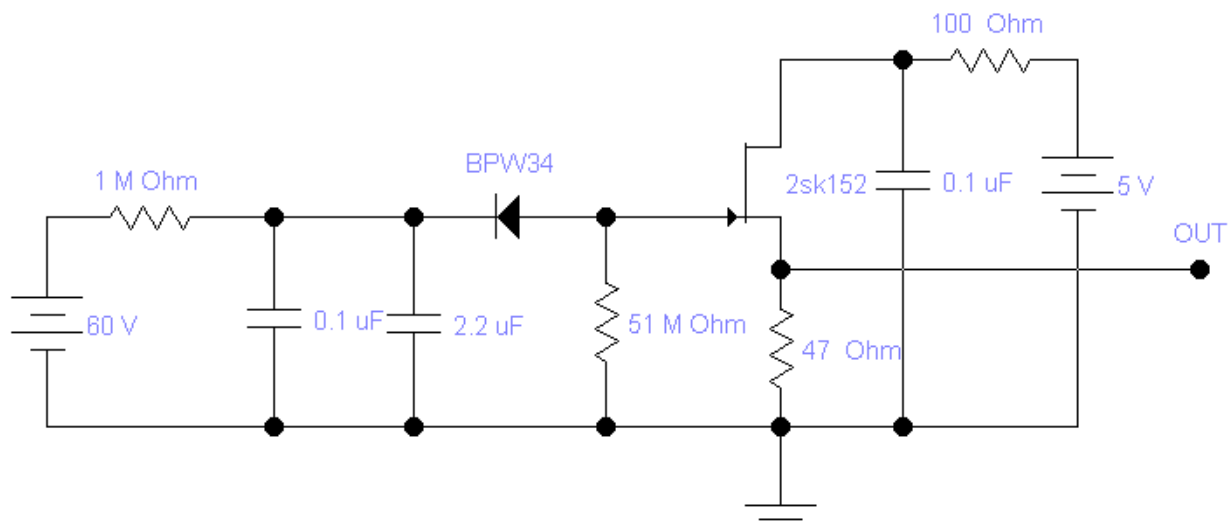


Рисунок 13 – Схема предварительного усилителя

Амплитуда выходного импульса истокового повторителя определяется емкостью детектора и полевого транзистора. Фотодиод BPW34 при напряжении смещения 60 В имеет емкость $C_D = 8$ пФ [13]. Входная емкость транзистора 2sk1522 $C_{iss} = 8$ пФ. Общая входная емкость C_{in} истокового повторителя без учета паразитной емкости равна 16 пФ.

При входном заряде $Q = 2,65$ фКл, амплитуда выходного импульса U_{preamp} составляет:

$$U_{preamp} = \frac{Q}{C_{in}}, \quad (12)$$

$$U_{preamp} = \frac{2,65 \cdot 10^{-15}}{16 \cdot 10^{-12}} = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ В} = 0,17 \text{ мВ}.$$

Основной усилитель представляет собой CR-RC² (дифференцирующий и два интегрирующих каскада) формирователь квазигауссного сигнала [11], построенный на активных фильтрах с использованием операционных усилителей NE5534 (рисунок 14).

Импульс напряжения на выходе предусилителя имеет положительную полярность, после прохождения трех инвертирующих каскадов он становится отрицательным. Так как аналого-цифровой преобразователь воспринимает и

преобразовывает в дискретный код только положительные значения входного напряжения, в схеме был добавлен четвертый инвертирующий каскад для дополнительного усиления и смены полярности выходного сигнала.

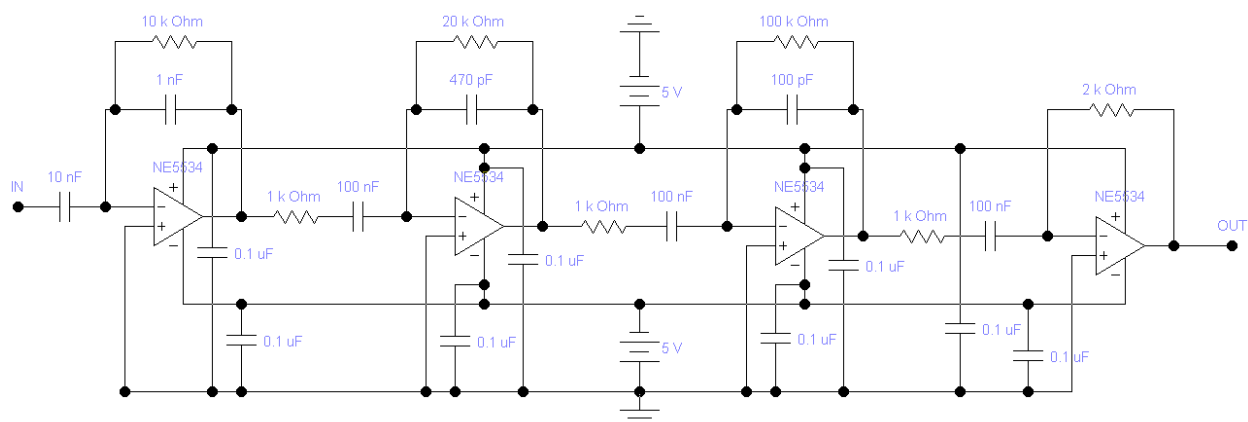


Рисунок 14 – Схема усилителя-формирователя

Схема обеспечивает усиление сигнала по напряжению в $K = 4000$ раз. Таким образом, амплитуда импульса на выходе усилителя-формирователя U_{amp} при поглощении в детекторе кванта с энергией 59,54 кэВ равна:

$$U_{amp} = U_{preamp} \cdot K, \quad (13)$$

$$U_{amp} = 1,65 \cdot 10^{-4} \cdot 4000 = 660 \text{ мВ.}$$

Принципиальная схема спектрометра представлена в приложении Б.

8.2 Измерения спектров

В работе проводились измерения рентгеновского и гамма-излучений радионуклидов Am^{241} , Eu^{152} , Ba^{133} , Cd^{109} и Co^{57} из комплекта ОСГИ-3. Источники располагались на расстоянии 3 мм от входного окна детектора. Время экспозиции – 1800 секунд. Набор спектров производился на АЦП фирмы «Парсек».

Гамма-квант, зарегистрированный в детекторе, на осциллограмме будет рассматриваться как положительный импульс с небольшим отрицательным недолетом, следующим за ним. Сильные отрицательные перепады импульсов, являются признаком того, что схема не экранируется достаточно хорошо,

ионизирующее излучение является причиной только перепада положительной полярности [6].

При поглощении в детекторе кванта с энергией 59,54 кэВ, выходной импульс спектрометра будет иметь вид, изображенный на рисунке 15.

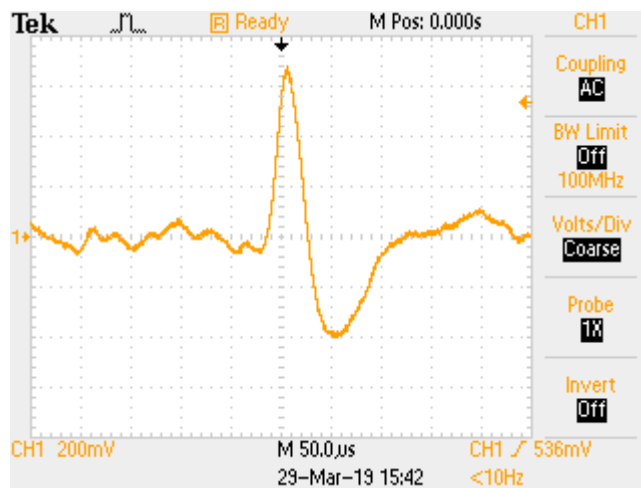


Рисунок 15 – Выходной импульс спектрометра при регистрации гамма-кванта с энергией 59,54 кэВ.

Амплитуда экспериментально полученного импульса равна 700 мВ, что примерно соответствует теоретическому расчету (660 мВ).

Результаты измерений спектров фотонного излучения представлены на рисунках 16-20.

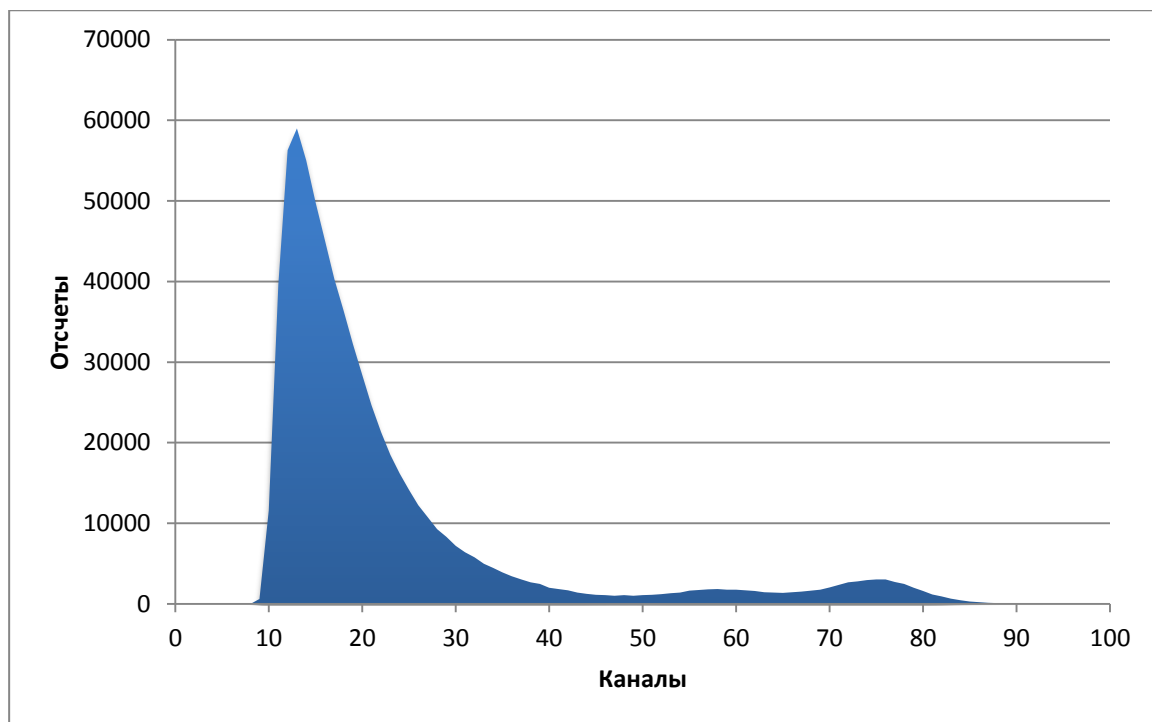


Рисунок 16 – Спектр излучения Am^{241} .

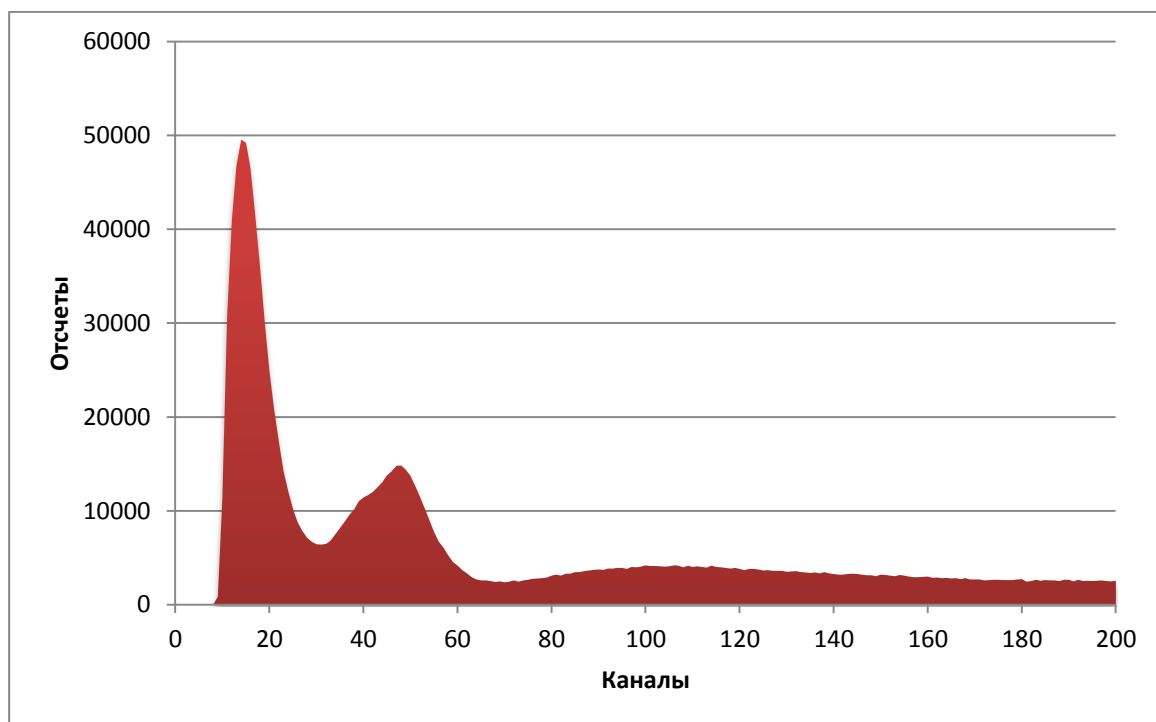


Рисунок 17 – Спектр излучения Eu^{152} .

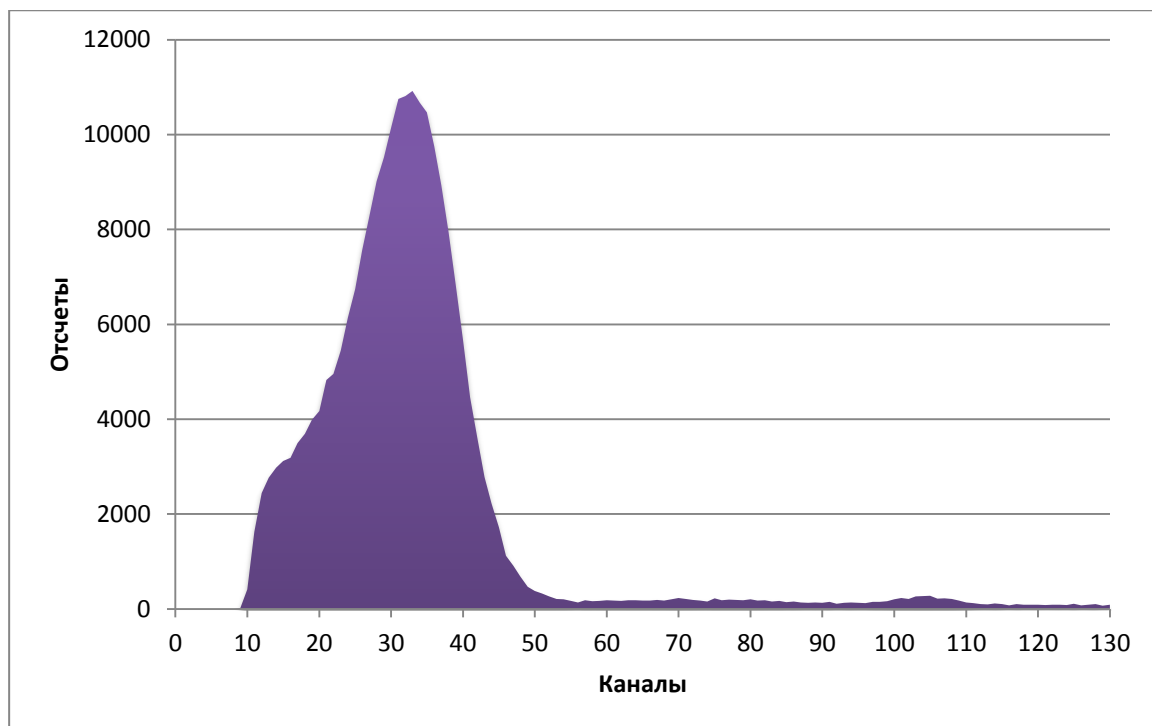


Рисунок 18 – Спектр излучения Ba^{133}

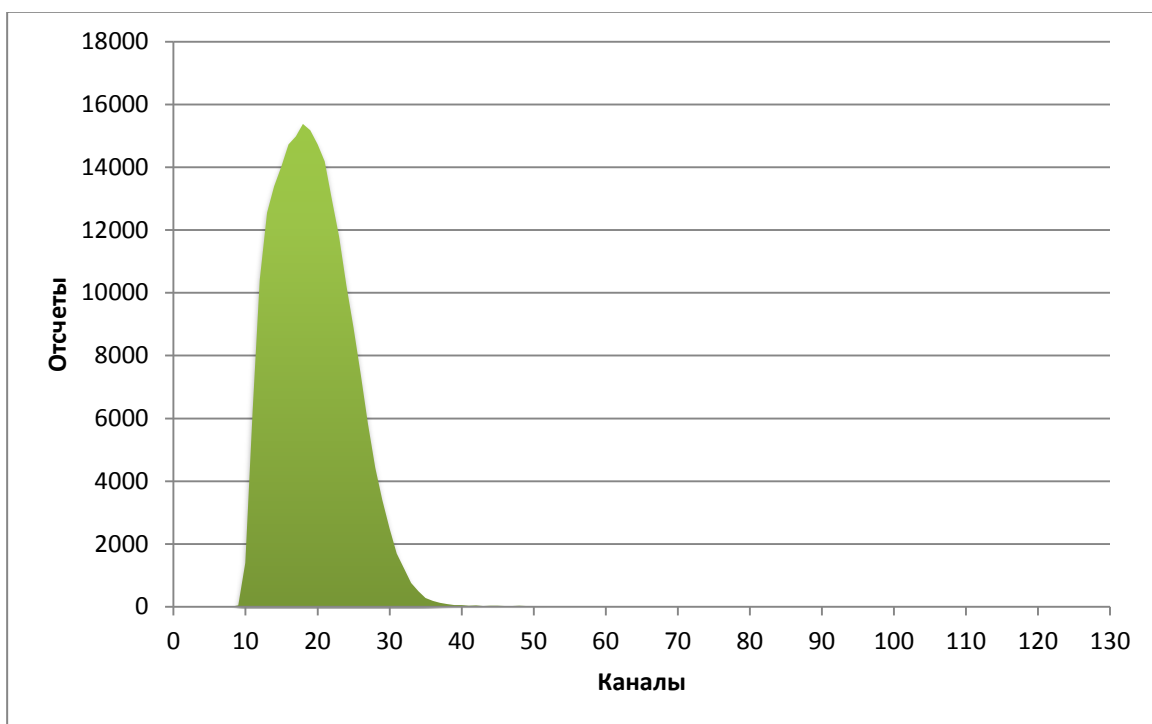


Рисунок 19 – Спектр излучения Cd^{109}

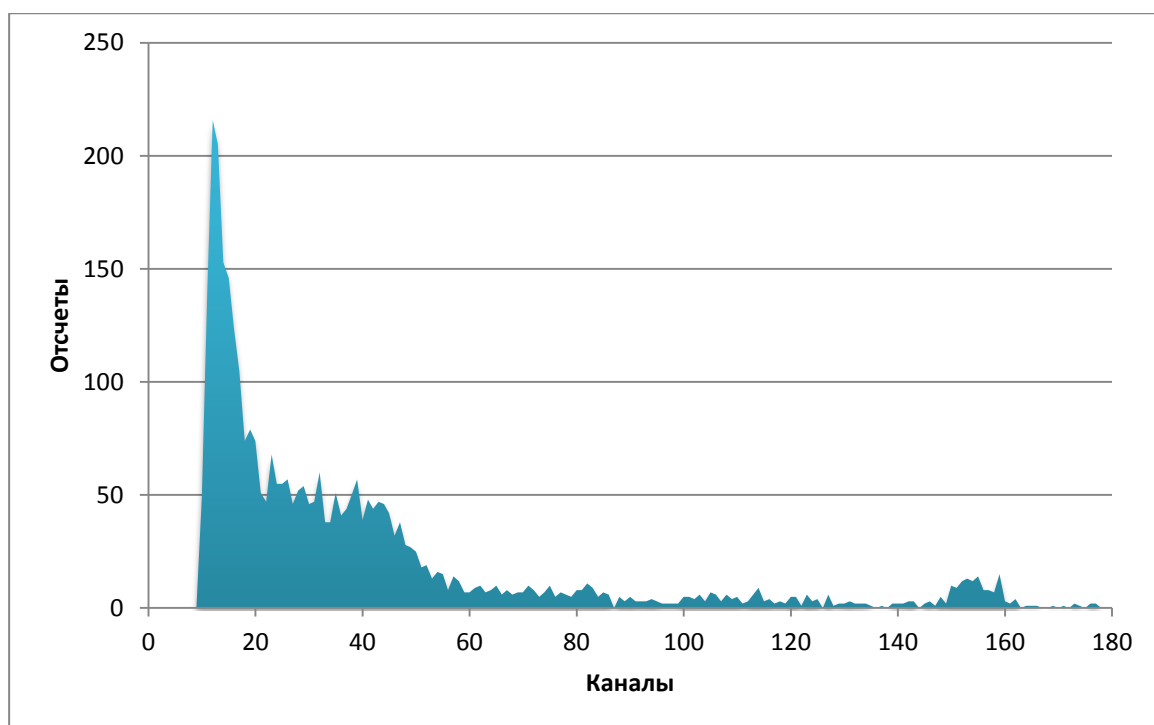


Рисунок 20 – Спектр излучения Co^{57}

Для наглядности все спектры представлены в логарифмическом масштабе на рисунке 21.

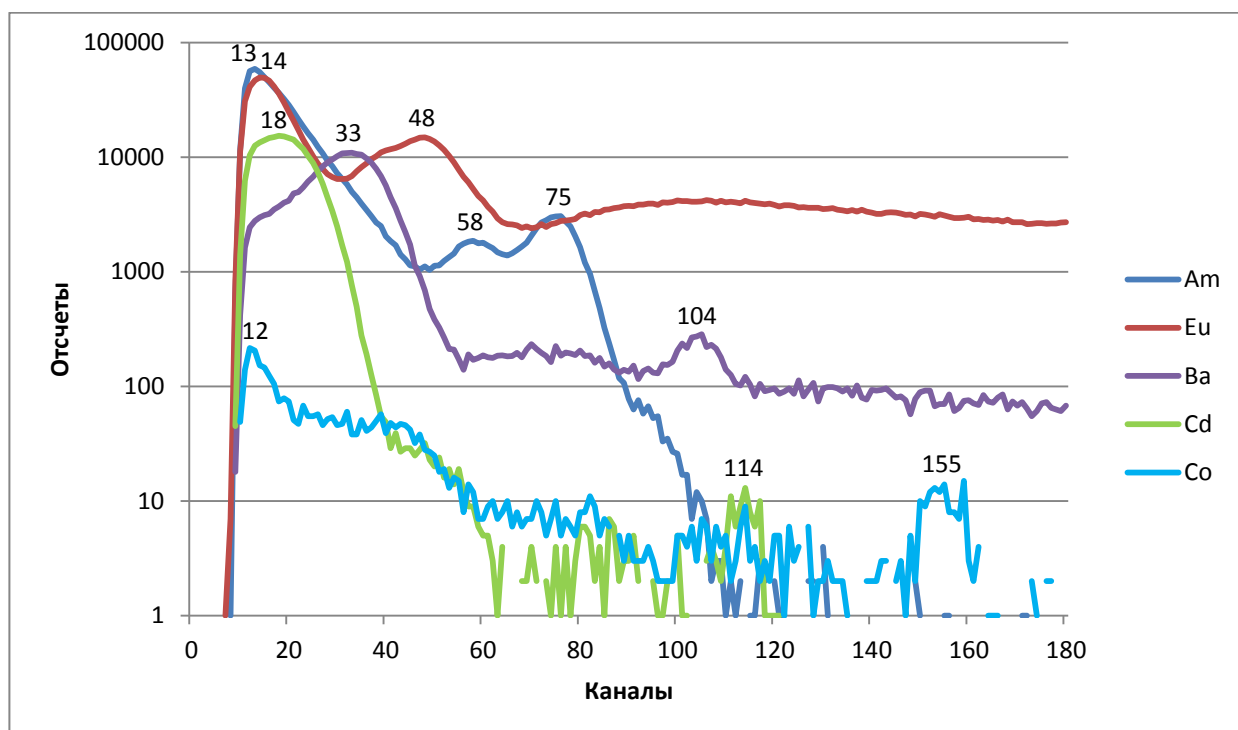


Рисунок 21 – Спектры излучения Am^{241} , Eu^{152} , Ba^{133} , Cd^{109} , Co^{57} в логарифмическом масштабе

На спектрах было выделено 11 пиков с центрами в следующих каналах: 13, 58, 75 (Америций); 14, 48 (Европий), 33, 104 (Барий), 18, 114 (Кадмий), 12, 155 (Кобальт).

8.3 Градуировка спектрометра

Для проведения градуировки и проверки спектрометра используются градуировочные источники фотонного излучения (например, ОСГИ).

При градуировке устанавливается соответствие между номером канала анализатора и энергией излучения (энергетическая градуировка шкалы), определяются энергетическое разрешение и эффективность регистрации.

8.3.1 Энергетическая градуировка шкалы

Для энергетической градуировки шкалы спектрометра, на основе полученных спектров эталонных источников фотонного излучения, была построена градуировочная кривая. Центроиды пиков были сопоставлены с соответствующими им энергиями первичных фотонов. В случае если в одиночном пике предполагается наличие фотонов разных энергий, для построения кривой использовалась наиболее интенсивная линия мультиплета. Пики и подъемы, расположенные в низкоэнергетической области спектров обусловлены наличием помех за счет источников питания и другого электронного оборудования.

Построение градуировочной кривой (рисунок 22) проводилось по 7 точкам: 18 канал, соответствующий рентгеновской линии кадмия-109 с энергией 22,163 кэВ и выходом 55,7 %, 33 канал, соответствующий рентгеновской линии бария-133 с энергией 30,973 кэВ и выходом 64,5 %, 48 канал, соответствующий рентгеновской линии европия-152 с энергией 40,118 кэВ и выходом 38,3 %, 75 канал, соответствующий гамма-линии америция-241 с энергией 59,54 кэВ и выходом 35,9 %, 104 канал, соответствующий гамма-

линии бария-133 с энергией 80,997 кэВ и выходом 34,1 %, 114 канал, соответствующий гамма-линии кадмия-109 с энергией 88,04 кэВ и выходом 3,6 %, 155 канал, соответствующий гамма-линии кобальта-57 с энергией 122,06 кэВ и выходом 85,6 % [12].

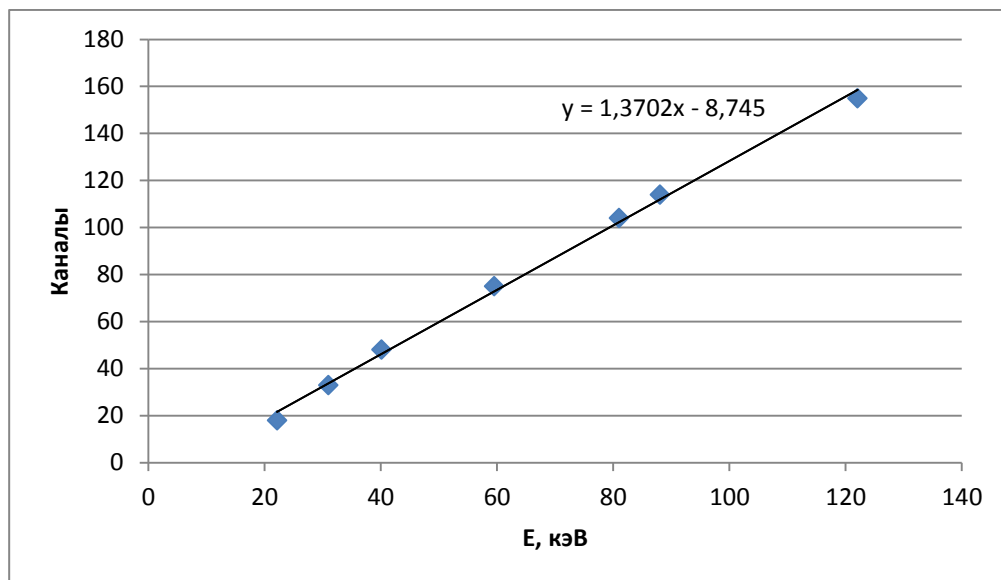


Рисунок 22 – Градуировочная кривая

Полученная градуировочная кривая имеет хорошую линейность и с небольшой погрешностью аппроксимируется в прямую, по уравнению которой можно определить энергию неизвестного пика с центром в 58 канале на спектре америция (рисунок 16):

$$58 = 1,3702 \cdot E - 8,745$$

$$E \approx 48,7 \text{ кэВ}$$

8.3.2 Эффективность регистрации

Абсолютная (полная) эффективность регистрации гамма-квантов $\epsilon_{\text{полн}}$ определяется как отношения полного числа зарегистрированных гамма-квантов в пике полного поглощения к полному числу гамма-квантов, испущенных источником. Полная эффективность может быть выражена в виде произведения четырех коэффициентов [13]:

$$\varepsilon_{\text{полн}} = \varepsilon_{\text{геом}} \cdot \varepsilon_{\text{погл}} \cdot \varepsilon_{\text{обр}} \cdot \varepsilon_{\text{собств}}, \quad (14)$$

где $\varepsilon_{\text{геом}}$ – геометрическая эффективность, $\varepsilon_{\text{погл}}$ – эффективность поглощения, $\varepsilon_{\text{обр}}$ – эффективность образца, $\varepsilon_{\text{собств}}$ – собственная эффективность.

Геометрическая эффективность $\varepsilon_{\text{геом}}$ представляет собой долю испущенных гамма-квантов, которые попадают в детектор. Для точечного источника она определяется выражением:

$$\varepsilon_{\text{геом}} = \frac{A}{4\pi r^2}, \quad (15)$$

где A – площадь поперечного сечения детектора; r – расстояние между источником и детектором. Этот коэффициент по существу не зависит от энергии фотона. Он отражает хорошо известный закон обратных квадратов для скорости счета, как функции расстояния между источником и детектором.

Эффективная площадь детектора $A = 7,5 \text{ мм}^2$, расстояние между источником и детектором $r = 2 \text{ мм}$. Тогда геометрическая эффективность $\varepsilon_{\text{геом}}$ равна:

$$\varepsilon_{\text{геом}} = \frac{7,5}{4 \cdot 3,14 \cdot 2^2} = 0,2984$$

Эффективность поглощения $\varepsilon_{\text{погл}}$ учитывает влияние промежуточных материалов (таких как корпус детектора, специальные поглотители и т.п.), которые поглощают часть входящего излучения перед тем, как оно провзаимодействует с детектором. Математическая формула этого коэффициента имеет вид:

$$\varepsilon_{\text{погл}} = \exp \left[- \sum_i \mu_i(E_\gamma) \rho_i x_i \right], \quad (16)$$

где μ_i – массовый коэффициент поглощения i -го промежуточного материала; ρ_i – плотность i -го промежуточного материала; x_i – толщина i -го промежуточного материала. Суммирование проводится по всем типам промежуточных материалов.

Данные для расчета эффективности поглощения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Данные для расчета эффективности поглощения [14]

E _γ , кэВ	Материал						ε _{погл}
	Алюминий			Плексиглас			
	ρ, г/см ³	х, см	μ, см ² /г	ρ, г/см ³	х, см	μ, см ² /г	
10	2,7	0,01	25,4	1,19	0,07	2,9	0,3956
20			3,06			0,319	0,8966
30			0,857			0,0933	0,9696
40			0,576			0,0447	0,9809
50			0,181			0,0298	0,9927
60			0,108			0,0248	0,995
80			0,0543			0,0226	0,9967
100			0,0377			0,0234	0,997
150			0,0277			0,0264	0,9971

Для $E_\gamma = 60$ кэВ эффективность поглощения $\varepsilon_{\text{погл}}$ будет равна:

$$\varepsilon_{\text{погл}} = \exp[-(0,108 \cdot 2,7 \cdot 0,01 + 0,0248 \cdot 1,19 \cdot 0,07)] = 0,995$$

Эффективность образца $\varepsilon_{\text{обр}}$ представляет собой долю испущенных гамма-квантов, которые реально покидают материал образца. Например, в пластине толщиной x и с коэффициентом пропускания T , равным $\exp(-\mu x)$, эффективность образца равна:

$$\varepsilon_{\text{обр}} = \frac{1 - \exp(-\mu x)}{\mu x} = \frac{T - 1}{\ln T}. \quad (17)$$

Этот коэффициент зависит от состава каждого образца.

Из-за малой толщины активной части источников ОСГИ-3 будем считать, что эффективность образца $\varepsilon_{\text{обр}}$ равна 1.

Собственная эффективность $\varepsilon_{\text{собств}}$ представляет собой вероятность того, что гамма-квант, который попадает в детектор, провзаимодействует и даст импульс в пик полного поглощения. Простейшим образом эту эффективность можно получить из стандартной формулы поглощения:

$$\varepsilon_{\text{собств}} = 1 - \exp(-\mu x), \quad (18)$$

где μ – фотоэлектрический массовый коэффициент ослабления; ρ – плотность чувствительного материала детектора; x – толщина чувствительного материала детектора.

Данные для расчета собственной эффективности приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Данные для расчета собственной эффективности [15]

E_γ , кэВ	Кремний			$\epsilon_{\text{собств}}$
	ρ , г/см ³	x , см	μ , см ² /г	
10	2,33	0,021	35,53	0,8242
20			4,18	0,145
30			1,25	0,0593
40			0,592	0,0286
50			0,367	0,0178
60			0,272	0,0132
80			0,196	0,0095
100			0,167	0,0081
150			0,137	0,0067

Для $E_\gamma = 60$ кэВ собственная эффективность $\epsilon_{\text{собств}}$ будет равна:

$$\epsilon_{\text{собств}} = 1 - \exp(-0,272 \cdot 2,33 \cdot 0,021) = 0,0132$$

Полную эффективность $\epsilon_{\text{полн}}$ рассчитаем по формуле (14). Данные для расчета представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Данные для расчета полной эффективности

E_γ , кэВ	$\epsilon_{\text{геом}}$	$\epsilon_{\text{погл}}$	$\epsilon_{\text{обр}}$	$\epsilon_{\text{собств}}$	$\epsilon_{\text{полн}}$
10	0,2984	0,3956	1	0,8242	0,0973
20		0,8966		0,145	0,0495
30		0,9696		0,0593	0,0172
40		0,9809		0,0286	0,0084
50		0,9927		0,0178	0,0053
60		0,995		0,0132	0,0039
80		0,9967		0,0095	0,0028
100		0,997		0,0081	0,0024
150		0,9971		0,0067	0,002

Для $E_\gamma = 60$ кэВ полная эффективность $\epsilon_{\text{полн}}$ будет равна:

$$\epsilon_{\text{полн}} = 0,2984 \cdot 0,995 \cdot 1 \cdot 0,0132 = 0,0039 = 3,9 \cdot 10^{-3}$$

На основе полученных экспериментальных данных, определим полную эффективность регистрации гамма-квантов с энергиями 59,54 и 80,997 кэВ, испускаемых изотопами америция-241 и бария-133 соответственно. Для этого необходимо разделить число фотонов, зарегистрированных детектором (полное

число отсчетов в пике с вычетом фона – площадь пика) на число фотонов, испущенных источником.

На рисунке 23 представлен спектр Am^{241} с выделенными площадями фона и пика с энергией 59,54 кэВ.

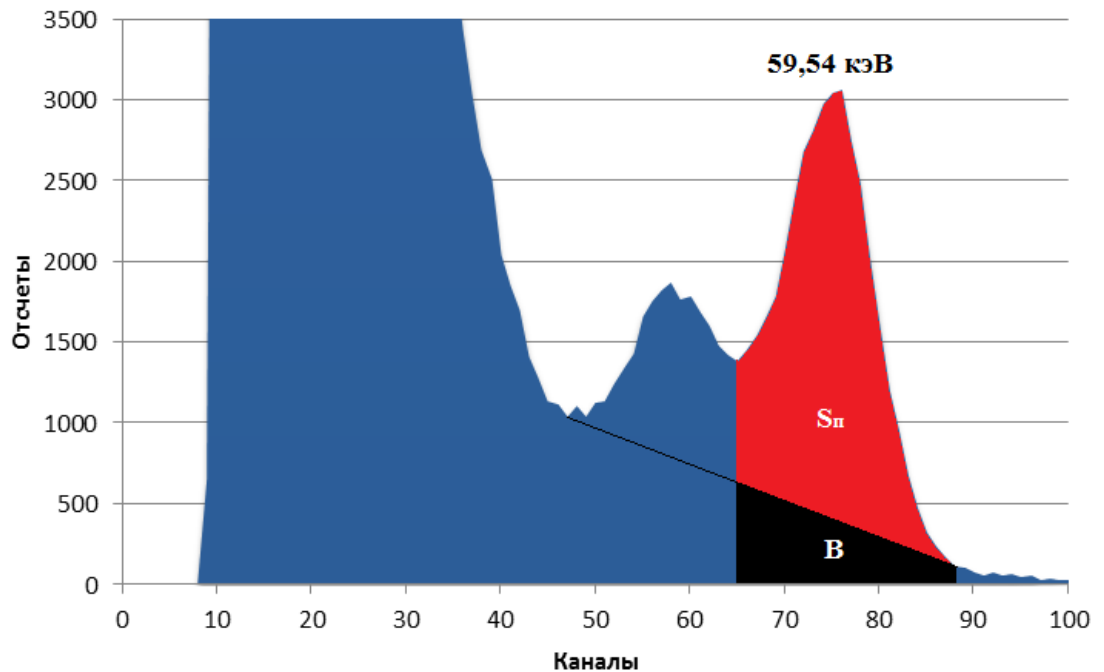


Рисунок 23 – Спектр Am^{241} с выделенными площадями фона и пика с энергией 59,54 кэВ.

Пик располагается в зоне шириной $L = 88 - 65 = 23$ канала. Полное число отсчетов y , суммированное по всем каналам зоны равно 39967.

Фон под пиком по форме представляет собой перевернутую трапецию с высотой $L = 23$ и основаниями $y_{65} = 582$ и $y_{88} = 118$. Площадь фона B , численно равная сумме фоновых отчетов, составляет:

$$B = \frac{1}{2} \cdot (y_{65} + y_{88}) \cdot L, \quad (19)$$

$$B = \frac{1}{2} \cdot (582 + 118) \cdot 23 = 8050.$$

Площадь пика S_{Π} рассчитаем по формуле (2):

$$S_{\Pi} = 39967 - 8050 = 31917.$$

Погрешности площади σ_S рассчитаем по формуле (3):

$$\sigma_S = \sqrt{31917 + 2 \cdot 8050} = 219$$

Начальная активность A_0 источника Am^{241} 15 октября 2014 года составляла 105 кБк. Период полураспада $T_{1/2} = 432,808$ лет. Измерения проводились 23 ноября 2018 года. Активность A источника на момент времени $t_1 = 1500$ суток составляет:

$$A(t_1) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_1} = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot t_1}{T_{1/2}}}, \quad (20)$$

$$A(t_1) = 105000 \cdot e^{-\frac{0,693 \cdot \frac{1500}{365}}{432,808}} = 104311 \text{ Бк.}$$

Квантовый выход n_γ для линии Am^{241} с энергией $E_\gamma = 59,54$ кэВ составляет 35,9 %, тогда мощность источника q равна:

$$q = A(t_1) \cdot n_\gamma(E_\gamma), \quad (21)$$

$$q = 104311 \cdot 0,359 = 37448 \text{ 1/с.}$$

Число испущенных источником гамма-квантов $N_{\text{исп}}(t_2)$ с энергией 59,54 кэВ за время $t_2 = 1800$ с. составляет:

$$N_{\text{исп}}(t_2) = q \cdot t_2, \quad (22)$$

$$N_{\text{исп}}(t_2) = 37448 \cdot 1800 = 67405901 = 6,74 \cdot 10^7.$$

Полная эффективность $\varepsilon_{\text{полн}}$ будет равна:

$$\varepsilon_{\text{полн}} = \frac{S_{\Pi}}{N_{\text{исп}}}, \quad (23)$$

$$\varepsilon_{\text{полн}} = \frac{31917}{67405901} = 0,00047 = 4,7 \cdot 10^{-4}$$

Таким образом, эффективность регистрации фотонов с энергией 60 кэВ, рассчитанная по формуле четырех сомножителей больше полученной на основе экспериментальных данных в $3,9 \cdot 10^{-3} / 4,7 \cdot 10^{-4} \approx 8$ раз.

Аналогичный расчет выполним для бария.

На рисунке 24 представлен спектр Ba^{133} с выделенными площадями фона и пика с энергией 80,997 кэВ.

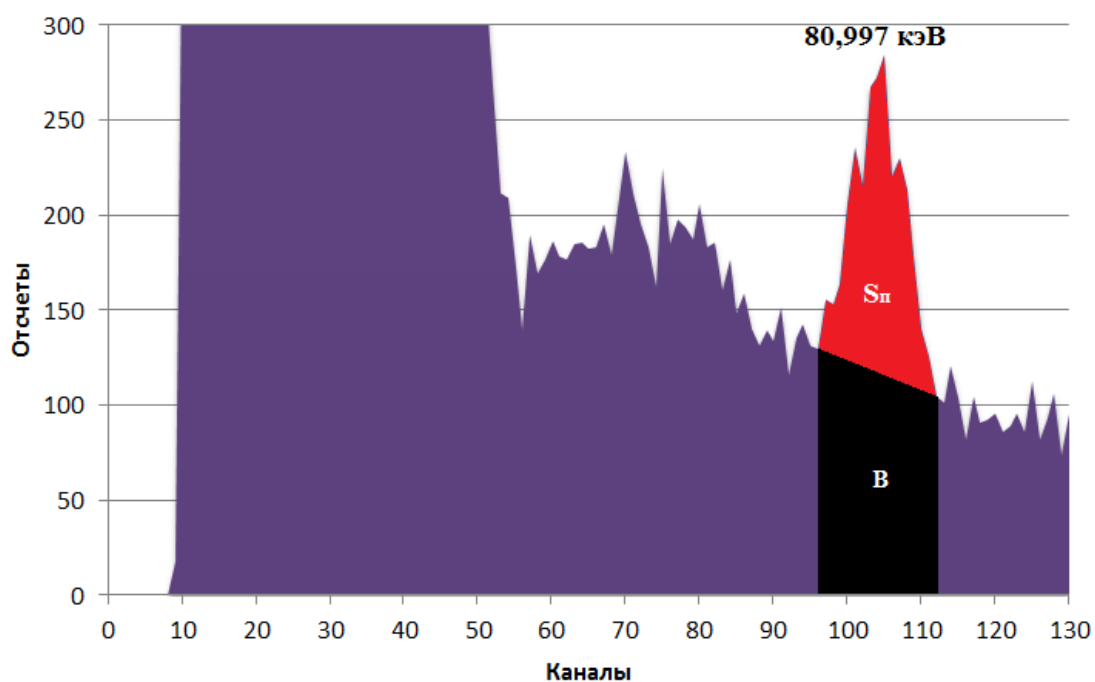


Рисунок 24 – Спектр Ba^{133} с выделенными площадями фона и пика с энергией 80,997 кэВ.

$$L = 112 - 96 = 16 \text{ каналов, } y = 3305, y_{96} = 130, y_{112} = 105.$$

$$B = \frac{1}{2} \cdot (130 + 105) \cdot 16 = 1880.$$

$$S_{\Pi} = 3305 - 1880 = 1425.$$

$$\sigma_S = \sqrt{1425 + 2 \cdot 1880} = 72.$$

$A_0 = 45 \text{ кБк (20.11.2007), } T_{1/2} = 10,54 \text{ лет, } t_1 = 4021 \text{ суток (23.11.2018),}$
 $n_{\gamma}(E_{\gamma} = 80,997 \text{ кэВ}) = 32,9 \%, t_2 = 1800 \text{ с.}$

$$A(t_1) = 45000 \cdot e^{-\frac{0,693 \cdot \frac{4021}{365}}{10,54}} = 21806 \text{ Бк.}$$

$$q = 21806 \cdot 0,329 = 7174 \text{ 1/с.}$$

$$N_{\text{исп}}(t_2) = 7174 \cdot 1800 = 12913489 = 1,29 \cdot 10^7.$$

$$\varepsilon_{\text{полн}} = \frac{1425}{12913489} = 0,00011 = 1,1 \cdot 10^{-4}$$

Таким образом, эффективность регистрации фотонов с энергией 80 кэВ, рассчитанная по формуле четырех сомножителей больше полученной на основе экспериментальных данных в $2,8 \cdot 10^{-3} / 1,1 \cdot 10^{-4} \approx 25$ раз.

Результаты теоретического и экспериментального расчетов полной эффективности графически представлены в логарифмическом масштабе на рисунке 25.

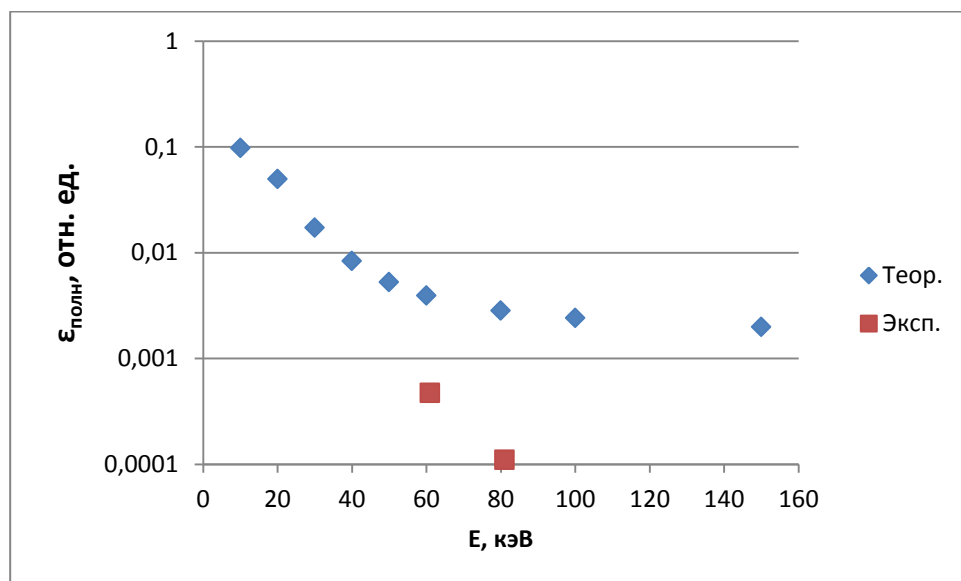


Рисунок 25 – Результаты теоретического и экспериментального расчетов полной эффективности

Как видно из графика, полная эффективность регистрации гамма-квантов экспоненциально убывает с увеличением энергии.

8.3.3 Энергетическое разрешение

Энергетическое разрешение определяет, какая минимальная разница в энергиях должна быть у двух фотонов одинаковой интенсивности, чтобы спектрометр мог их различить [1]. Экспериментально оценить энергетическое разрешение можно с помощью полной ширины пика на половине его высоты (ПШПВ), которая есть не что иное, как ширина распределения амплитуд выходных импульсов детектора на половине высоты ($\Delta_{1/2}$).

Рассчитаем $\Delta_{1/2}$ для фотонов с энергией 59,54 кэВ по формуле (9):

$$\Delta_{1/2} = 2,355 \cdot \sqrt{0,1 \cdot 59,54 \cdot 10^3 \cdot 3,75} = 352 \text{ эВ} = 0,35 \text{ кэВ}.$$

Ширина пика с энергией 59,54 кэВ на спектре америция (рисунок 25) на половине высоты составляет 15 каналов $\approx 11,11$ кэВ, что больше рассчитанного значения в $11,11 / 0,35 \approx 32$ раза.

Аналогично рассчитаем $\Delta_{1/2}$ для фотонов с энергией 80,997 кэВ:

$$\Delta_{1/2} = 2,355 \cdot \sqrt{0,1 \cdot 80,997 \cdot 10^3 \cdot 3,75} = 410 \text{ эВ} = 0,41 \text{ кэВ}.$$

Ширина пика с энергией 80,997 кэВ на спектре бария (рисунок 26) на половине высоты составляет 15 каналов $\approx 10,9$ кэВ, что больше рассчитанного значения в $10,9 / 0,41 \approx 27$ раз.

9 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не только масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности (потенциала) разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Через такую оценку ученый может найти партнера для дальнейшего проведения научного исследования, коммерциализации результатов такого исследования и открытия бизнеса.

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, чтобы удовлетворить потребителя, каков бюджет научного проекта, сколько времени потребуется для выхода на рынок и т.д.

Таким образом, целью данного раздела является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;

- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

9.1 Предпроектный анализ

9.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования является разработанный, портативный, бюджетный спектрометр рентгеновского и низкоэнергетического гамма-излучений на основе кремниевого pin-фотодиода.

Целевым рынком данной разработки будут являться промышленные предприятия, научно-исследовательские институты и высшие учебные заведения, проводящие исследования спектров рентгеновского излучения, образованных радионуклидными и генерирующими источниками (рентгеноструктурный и рентгенофлуоресцентный анализы).

9.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Данный анализ проведен с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 6. B_{ϕ} – продукт, который является результатом данной работы, B_{k1} и B_{k2} – конкурентные разработки. В качестве конкурентных разработок были приняты: B_{k1} – БДКР-01, производство компании «РАДЭК». B_{k2} – XR100-CR от компании «Amptek».

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять единицу.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i \quad (24)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Таблица 6 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	B_{k1}	B_{k2}	K_{ϕ}	K_{k1}	K_{k2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	3	5	5	0,3	0,5	0,5
Помехоустойчивость	0,1	3	4	5	0,3	0,4	0,5
Энергоэкономичность	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
Надежность	0,1	4	5	5	0,4	0,5	0,5
Безопасность	0,1	4	5	5	0,4	0,5	0,5
Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
Экономические критерии оценки эффективности							
Конкурентоспособность продукта	0,1	4	5	5	0,4	0,5	0,5
Цена	0,1	5	3	2	0,5	0,3	0,2
Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
Итого	1	43	45	46	4,3	4,5	4,6

Из данного анализа видно, что разработанный спектрометр может конкурировать с имеющимися на рынке приборами за счет крайне низкой себестоимости при стандартном наборе определяющих его параметров.

9.1.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту.

В таблице 7 представлен SWOT-анализ в виде таблицы, так же показаны результаты пересечений сторон, возможностей и угроз.

Таблица 7 – SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Простота устройства. С2. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями. С3. Возможность усовершенствования самим потребителем.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Непривлекательный дизайн. Сл2. Отсутствие инжиниринговой компании, способной наладить серийное производство.
Возможности: В1. Государственное финансирование. В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт. В3. Повышение стоимости конкурентных разработок.	Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные возможности»: Нужно показать покупателям простоту устройства и сделать упор на портативность и дешевизну.	Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»: Появление компании, которая будет готова построить производство, даст шанс новым потребителям получать устройство в короткие сроки.
Угрозы: У1. Развитая конкуренция технологий производства У2. Введение дополнительных государственных требований к сертификации	Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»: Более низкая стоимость устройства по сравнению с другими аналогами, а также простота обслуживания позволит разработанному спектрометру быть востребованным в отечественных учреждениях.	Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»: Следует повысить характеристики, сделать более привлекательным внешний вид.

Из SWOT-анализа видно, что для реализации данной работы необходимо получить дополнительное инвестирование (получение грантов, субсидий, премиальных и т.д.).

9.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения).

Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в таблице 8.

Таблица 8 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	5
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	3
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	3	3
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	2	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	2	2
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	2
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	2
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	1
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	2	1
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	1
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	2
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	2
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	2	1
	ИТОГО БАЛЛОВ	32	30

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (25)$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Значение $B_{\text{сум}}$ позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации.

Суммарное количество баллов по степени проработанности научного проекта $B_{\text{сум}} = 32$, а по уровню имеющихся знаний у разработчика $B_{\text{сум}} = 30$, в обоих случаях это свидетельствует о средней перспективности научной разработки.

9.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

При коммерциализации научно-технических разработок продавец (а это, как правило, владелец соответствующих объектов интеллектуальной собственности), преследует вполне определенную цель, которая во многом зависит от того, куда в последующем он намерен направить (использовать, вложить) полученный коммерческий эффект. Это может быть получение средств для продолжения своих научных исследований и разработок (получение финансирования, оборудования, уникальных материалов, других научно-технических разработок и т.д.), одноразовое получение финансовых ресурсов для каких-либо целей или для накопления, обеспечение постоянного притока финансовых средств, а также их различные сочетания. При этом время продвижения товара на рынок во многом зависит от правильности выбора метода коммерциализации.

Перспективность данной научной разработки средняя, так как не все показатели готовности к коммерциализации изучены. Для организации

предприятия этого не достаточно. Но, так как основной научно-технический задел определен, этого хватит для коммерциализации объекта исследования следующими методами: торговля патентной лицензией, передача ноу-хау и инжиниринг. Степень проработанности научного проекта и уровень имеющихся знаний у разработчика достаточны для реализации выбранных пунктов.

9.2 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

1. Цели и результат проекта.

В данном разделе необходимо привести информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 9 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Промышленные предприятия, научно-исследовательские институты и высшие учебные заведения, проводящие исследования спектров рентгеновского излучения	Разработанный спектрометр рентгеновского и низкоэнергетического гамма-излучений на основе pin-фотодиода.

Таблица 10 – Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Разработка портативного, бюджетного спектрометра фотонного ионизирующего излучения на основе кремниевого pin-фотодиода.
Ожидаемые результаты проекта:	Возможность детектирования рентгеновского и низкоэнергетического гамма-излучений
Критерии приемки результата проекта:	Энергетический диапазон измерений от 10 до 120 кэВ
Требования к результату проекта:	Требование:
	Хорошее энергетическое разрешение
	Удовлетворение выходного сигнала требованиям амплитудного анализатора
	Низкая стоимость исполнения

2. Организационная структура проекта.

На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте.

Таблица 11 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо-затраты, час.
1	Яковлева Валентина Станиславовна, отделение ядерно-топливного цикла, профессор	Руководитель	Разработка и составление технического задания проекта, выбор направления исследования	51,6
2	Тимошенко Евгений Аркадьевич, магистрант	Исполнитель	Разработка и изготовление спектрометра, проведение измерений, расчет характеристик устройства	371,4
ИТОГО:				423

3. Ограничения и допущения проекта.

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта.

Таблица 12 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/допущения
3.1. Бюджет проекта	74576 руб.
3.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ
3.2. Сроки проекта:	4 месяца
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	10.02.2019
3.2.2. Дата завершения проекта	01.06.2019
3.3. Прочие ограничения и допущения*	Ограничения по времени использования источников ионизирующего излучения

9.3 Планирование научно-исследовательской работы

В данном разделе составлен перечень этапов и работ по выполнению НИР, проведено распределение исполнителей по видам работ. Порядок этапов и работ при выполнении ВКР приведен в таблице 13.

Таблица 13 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	Содержание работы	Исполнитель
Разработка технического задания на НИР	Разработка ТЗ на ВКР	Руководитель
	Составление и утверждение ТЗ	Руководитель, магистрант
Выбор направления исследования	Сбор и поиск тематической литературы в рамках проекта	Магистрант
	Сравнение аналогичных изделий, выбор и обоснование предмета разработки	Руководитель, магистрант
Теоретические исследования	Разработка и расчет электронной схемы спектрометра	Магистрант
	Расчет характеристик детектора	Магистрант
Изготовление	Изготовление и сборка спектрометра	Магистрант
Тестирование	Проверка устройства	Магистрант
	Измерение спектров фотонного излучения	Магистрант
	Анализ и обработка полученных данных	Магистрант
	Расчет характеристик спектрометра	Магистрант
	Обобщение и оценка результатов	Руководитель, магистрант
Оформление отчета по НИР	Оформление пояснительной записки	Магистрант
	Подготовка к защите ВКР	Магистрант

9.3.1 Определение трудоемкости выполнения НИОКР

Следующим этапом является определение трудоемкости выполнения НИОКР. Трудоемкость выполнения НИОКР оценивается экспертным путем в

человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости работ используется следующая формула:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{\min\ i} + 2t_{\max\ i}}{5}, \quad (26)$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{\min\ i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max\ i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i}, \quad (27)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

9.3.2 Разработка графика проведения научного исследования

Затем был разработан календарный план работ. В ходе данной работы был построен ленточный графика проведения НИР в форме диаграмм Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (28)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (29)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22$$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} были округлены до целого числа и сведены в таблице 14, на основании которой был построен календарный план-график.

Таблица 14 – Временные показатели проведения научного исследования

Исполнитель	$t_{\min i}$	$t_{\max i}$	$t_{\text{ож}i}$	Ψ_i	T_{pi} , раб. дн.	T_{ki} , кал. дн.
Р	2	5	3,2	1	3,2	3,9
РМ	2	7	4	2	2	2,4
М	5	20	11	1	11	13,4
РМ	3	10	5,8	2	2,9	3,5
М	4	8	5,6	1	5,6	6,8
М	1	3	1,8	1	1,8	2,2
М	5	15	9	1	9	11
М	1	5	2,6	1	2,6	3,2
М	2	10	5,2	1	5,2	6,3

М	1	3	1,8	1	1,8	2,2
М	3	5	3,8	1	3,8	4,6
РМ	3	10	5,8	2	2,9	3,5
М	10	20	14	1	14	17,1
М	2	5	3,2	1	3,2	3,9
Сумма	44	126	76,8	-	69	84,2

9.3.3 Календарный план-график в виде диаграммы Гантта

На основании полученных данных был построен календарный план-график в виде диаграммы Гантта (таблица 15). График строится с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике следует выделить различным цветом в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 15 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Вид работ	Исп.	T_{ki}	Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь	
			2	3		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
Разработка ТЗ на ВКР	Р	3,9														
Составление и утверждение ТЗ	РМ	2,4														
Сбор и поиск литературы в рамках проекта	М	13,4														
Сравнение аналогичных изделий, выбор и обоснование предмета разработки	РМ	3,5														
Разработка и расчет электронной схемы спектрометра	М	6,8														
Расчет характеристик детектора	М	2,2														

- материальные затраты НТИ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

9.4.1 Расчет материальных затрат НТИ

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5% от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов).

Результаты по данной статье заносятся в таблицу 16.

Отсутствие в таблице разделения на источники финансирования говорит о том, что источник один. Источник финансов в данной работе – НИ ТПУ.

Таблица 16 – Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Количество	Цена за ед., руб	Сумма, руб
Pin-фотодиод	BPW34	1	20	40
Транзистор	2sk152	1	30	30
Операционный усилитель	NE5534	4	10	40
Резистор	SMD 0805	15	1	15
Конденсатор	SMD 0805	14	1	14
Всего				139

9.4.2 Затраты на спецоборудование

В данной работе спецоборудование не приобреталось, а использовалось уже имеющееся, поэтому затраты по данной статье калькуляции входят в общую себестоимость в виде амортизационных отчислений, сумма которых определяется по следующей формуле:

$$A = \frac{H_A \cdot C \cdot T_o}{365 \cdot 100\%}, \quad (30)$$

где A – амортизационные отчисления, руб.;

C – стоимость используемого оборудования, руб.;

H_A – годовая норма амортизации, %;

T_o – время использования оборудования, сутки.

Амортизационные отчисления были рассчитаны для осциллографа, используемого в работе:

$$A = \frac{18 \cdot 121742 \cdot 3,2}{365 \cdot 100\%} = 192 \text{ руб.}$$

Затраты на оборудование составили 192 рубля.

9.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (31)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, магистра) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (32)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (33)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб.дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 17)

Таблица 17 - Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	52	52
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
– отпуск	48	48
– невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный оклад работника:

$$З_м = З_б \cdot k_p. \quad (34)$$

где $З_б$ – базовый оклад;

k_p – районный коэффициент.

Например, для руководителя расчет основной заработной платы, зная, что его оклад 47104 руб./месяц и районный коэффициент для Томска равен 1,3 (учитывая размер оклада за 2016 год – 1,28), проводится следующим образом:

находим месячный должностной оклад:

$$З_м = 47104 \cdot 1,28 = 60293 \text{ руб./месяц};$$

рассчитываем среднедневную заработную плату:

$$З_{дн} = \frac{60293 \cdot 10,4}{251} = 2498 \text{ руб./день};$$

рассчитываем основную заработную плату:

$$З_{осн} = 2498 \cdot 8,6 = 21483 \text{ руб.}$$

Подобный расчет проводится для вычисления основной заработной платы магистра.

Данные и результаты расчета основной заработной платы приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$З_б$	k_p	$З_м$, руб./месяц	$З_{дн}$, руб./день	T_p , раб. дн.	$З_{осн}$, руб.
Руководитель	47104	1,28	60293	2498	8,6	21483
Магистр	12664	1,3	16463	682	61,9	42225
Итого						63708

9.4.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и

общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}, \quad (35)$$

где $З_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты;

$З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.

В таблице 19 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 19 – Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата	21483	42225
Дополнительная зарплата	2148	4223
Зарплата исполнителя	23631	46448
Итого по статье $C_{\text{зп}}$	70079	

9.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (36)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2019 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 № 212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1

ст. 58 закона № 212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

$$k_{\text{внеб}} = k_{\text{пф}} + k_{\text{с}} + k_{\text{пн}}, \quad (37)$$

где $k_{\text{пф}}$ – коэффициент отчисления в пенсионный фонд;

$k_{\text{с}}$ – коэффициент отчисления страховых взносов;

$k_{\text{пн}}$ – коэффициент отчисления в подоходный налог.

Отчисления во внебюджетные фонды от затраты на оплату труда руководителя и инженера представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель	Инженер
Основная заработная плата, руб.	21483	42225
Дополнительная заработная плата, руб.	2148	4223
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	0,271
Сумма отчислений, руб.	6404	12587

9.4.6 Затраты на научные и производственные командировки

Затраты на научные и производственные командировки исполнителей определяются в соответствии с планом выполнения темы и с учетом действующих норм командировочных расходов различного вида и транспортных тарифов. В данной выпускной квалификационной работе затраты на командировки равны нулю.

9.4.7 Контрагентные расходы

Контрагентные расходы включают затраты, связанные с выполнением каких-либо работ по теме сторонними организациями (контрагентами, субподрядчиками), т.е.:

1. Работы и услуги производственного характера, выполняемые сторонними предприятиями и организациями.

2. Работы, выполняемые другими учреждениями, предприятиями и организациями (в т.ч. находящимися на самостоятельном балансе опытными (экспериментальными) предприятиями по контрагентским (соисполнительским) договорам на создание научно-технической продукции, головным (генеральным) исполнителем которых является данная научная организация).

Расчет величины этой группы расходов зависит от планируемого объема работ и определяется из условий договоров с контрагентами или субподрядчиками. В данной работе затраты по данной статье расходов отсутствуют.

9.4.8 Накладные расходы

В данную статью входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных служб. По этой статье учитываются оплата труда административно-управленческого персонала, содержание зданий, оргтехники и хозяйственного инвентаря, амортизация имущества, расходы по охране труда и подготовке кадров.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = \Pi_{\text{эл}} \cdot P \cdot F_{\text{об}}, \quad (38)$$

где $\Pi_{\text{эл}}$ – тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб. за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

$F_{\text{об}}$ – время использования оборудования, ч.

ПК:

$$C = 5,8 \cdot 0,3 \cdot 151,2 = 263,1$$

Паяльник:

$$C = 5,8 \cdot 0,05 \cdot 264 = 76,6$$

Осциллограф:

$$C = 5,8 \cdot 0,03 \cdot 76,8 = 13,4$$

Генератор импульсов:

$$C = 5,8 \cdot 0,05 \cdot 76,8 = 22,3$$

Затраты на электроэнергию составили 375 рублей.

9.4.9 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в таблице 21.

Таблица 21 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	331
2. Затраты по заработной плате исполнителей темы	70079
3. Отчисления во внебюджетные фонды	18991
4. Затраты на научные и производственные командировки	—
5. Контрагентные расходы	—
6. Накладные расходы	375
Бюджет затрат НТИ	89776

Из таблицы видно, что итоговая стоимость проекта будет составлять порядка 90 тысяч рублей, основной вклад в итоговую сумму бюджета вносят затраты на заработную плату.

9.5 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информация по данному разделу представлена в таблице 22.

Таблица 22 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска*	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Неисправность спектрометра	Увеличение сроков сдачи проекта в связи с поиском неисправности	2	5	Средний	Проверка электрической схемы, печатной платы и электронных компонентов на этапе изготовления	Неисправность электронных компонентов, ошибки в построении схемы, дефекты пайки и разрыв дорожек платы, короткое замыкание в цепи
2	Недостаточное финансирование	Увеличение сроков сдачи проекта, прекращение исследования	1	3	Низкий	Получение дополнительных грантов на исследование	Изменение политики университета в отношении данного исследования

9.6 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. В качестве аналога был выбран блок детектирования БДКР-01, производство компании «РАДЭК».

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в выпускной квалификационной работе магистра технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{\text{pi}}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (39)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i-го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}1} = \frac{89776}{149350} = 0,6$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}2} = \frac{149350}{149350} = 1$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{\text{р-исп}i} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (40)$$

где $I_{\text{р-исп}i}$ – интегральный показатель ресурсоэффективности для i-го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i-го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (таблица 23).

Таблица 23 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог
Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	5	5
Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	3	5
Помехоустойчивость	0,15	3	4
Энергосбережение	0,2	5	4
Надежность	0,25	4	5
Материалоемкость	0,15	5	4
Итого:	1	4,15	4,5

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 = 4,15$$

$$I_{p-исп2} = 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 = 4,5$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{испi}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{испi} = \frac{I_{p-испi}}{I_{финр}^{испi}}. \quad (41)$$

$$I_{исп1} = \frac{4,15}{0,6} = 6,92$$

$$I_{исп2} = \frac{4,5}{1} = 4,5$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{\text{ср}}$):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп1}}}{I_{\text{исп2}}}. \quad (42)$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{6,92}{4,5} = 1,54.$$

Таблица 24 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Аналог
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,6	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,15	4,5
3	Интегральный показатель эффективности	6,92	4,5
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,54	1

Таким образом, основываясь на определении финансовой и ресурсной эффективности исследования, проведя необходимый сравнительный анализ, можно сделать вывод о превосходстве выполненной разработки над выбранным аналогом [16].

10 Социальная ответственность

Важнейшей мерой, направленной на снижение производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное введение комплексной системы управления охраной труда. Вместе с тем должно осуществляться повышение качества и эффективности всех средств коллективной и индивидуальной защиты от вредных и опасных факторов.

Согласно статье 209 ТК РФ введем следующие понятия:

Охрана труда – это система правовых, социально-экономических, организационно-технических, санитарно-гигиенических, лечебно-профилактических мероприятий, реабилитационных и иных мероприятий, обеспечивающих сохранение жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности.

Условия труда – совокупность факторов производственной среды и трудового процесса, оказывающих влияние на работоспособность и здоровье работника.

Вредный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его заболеванию.

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его травме.

Безопасные условия труда – условия труда, при которых воздействие на работающих вредных или опасных производственных факторов исключено либо уровни их воздействия не превышают установленные нормативы.

Рабочее место – место, в котором работник должен находиться или в которое ему необходимо прибыть в связи с его работой и которое прямо или косвенно находится под контролем работодателя.

Средства индивидуальной и коллективной защиты работников – технические средства, используемые для предотвращения или уменьшения воздействия на работников вредных или опасных производственных факторов, а также для защиты от загрязнения.

Производственная деятельность – совокупность действий людей с применением орудий труда, необходимых для превращения ресурсов в готовую продукцию, включающих в себя производство и переработку различных видов сырья, строительство, оказание различных видов услуг [17].

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

10.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

На работника лаборатории, проводящего экспериментальные исследования, могут воздействовать следующие факторы:

Физические:

- температура и влажность воздуха;
- шум;
- статическое электричество;
- электромагнитное поле;
- освещённость;
- ионизирующее излучение;
- пары вредных веществ;
- высокая температура поверхности изделия, инструмента и расплавов припоев.

Психофизиологические:

- физические перегрузки (статические, динамические);
- нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

В таблице 25 приведены основные элементы производственного процесса, которые формируют опасные и вредные факторы.

Таблица 25 – Элементы, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Измерение спектров источников ОСГИ	Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне		1. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009». 2. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010 N 40 (ред. от 16.09.2013) «Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)»
Работа с ПЭВМ, осциллографом, электропаяльником, генератором импульсов, а также источниками высокого напряжения		Электрический ток	3. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов
	Электромагнитные поля		4. СанПин 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
		Повышенная температура поверхности инструмента, изделия и расплавов припоев	5. ТИ Р М-075-2003 межотраслевая типовая инструкция по охране труда для работников, занятых пайкой и лужением изделий паяльником.
	Повышенная загазованность воздуха рабочей зоны парами вредных химических веществ		6. Постановление Правительства РФ от 25.04.2012 № 390 «О противопожарном режиме» (ред. от 07.03.2019). 7. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

10.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния на персонал

10.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальная удостоверение.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

10.2.2 Организация рабочего места оператора ПК

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 26.

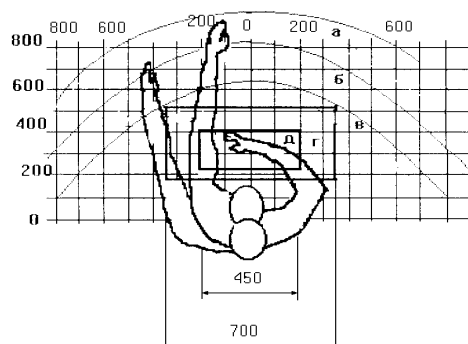


Рисунок 26 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

а – зона максимальной досягаемости рук;

б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;

в – зона легкой досягаемости ладони;

г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;

д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура – в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);
- документация: в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования:

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не

менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15 градусов. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической

напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

10.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии со [18] и приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °C	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1
Теплый	23-25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями

к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20..25 °С, зимой – 13..15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля.

Согласно [19] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц – 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час.

По нормам [18] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час. Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

10.2.4 Правила безопасности при работе с паяльником

При работе с паяльником в соответствии с [20] необходимо соблюдать следующие правила:

1. Работники, занятые пайкой паяльником, должны обеспечиваться средствами индивидуальной защиты (перчатки, очки, респираторы, спецодежда).

2. Работы с вредными и взрывопожароопасными веществами при нанесении припоев, флюсов, паяльных паст, связующих и растворителей должны проводиться при действующей общеобменной и местной вытяжной вентиляции. Системы местных отсосов должны включаться до начала работ и выключаться после их окончания.

3. Паяльник должен проходить проверку и испытания в сроки и объемах, установленных технической документацией на него.

4. Кабель паяльника должен быть защищен от случайного механического повреждения и соприкосновения с горячими деталями.

5. Для местного освещения рабочих мест при пайке паяльником должны применяться светильники с непросвечивающими отражателями. Светильники должны располагаться таким образом, чтобы их светящие

элементы не попадали в поле зрения работников.

6. На участках приготовления флюсов должны быть водопроводный кран с раковиной и нейтрализующие жидкости для удаления паяльных флюсов, содержащих фтористые и хлористые соли, в случаях их попадания на кожу работника.

7. Рабочие поверхности столов и оборудования на участках пайки паяльником, а также поверхности ящиков для хранения инструментов должны покрываться гладким, легко очищаемым и обмываемым материалом.

8. Использованные при пайке паяльником салфетки и ветошь должны собираться в специальную емкость, удаляться их помещения по мере их накопления в специально отведенное место.

9. Работник, занятый пайкой паяльником, обязан немедленно извещать своего непосредственного или вышестоящего руководителя о любых чрезвычайных ситуациях.

10. Работник, занятый пайкой паяльником, обязан соблюдать правила личной гигиены: перед приемом пищи и после окончания работы вымыть руки теплой водой с мылом. Пищу необходимо принимать в специально оборудованных для этой цели помещениях.

10.3 Радиационная безопасность

В любой отрасли человеческой деятельности существуют те или иные опасности для здоровья человека. Для исключения этих опасностей и тем самым для сохранения здоровья человека в каждой отрасли его деятельности разработаны соответствующие правила техники безопасности.

Для обеспечения радиационной безопасности при нормальной эксплуатации источников излучения необходимо руководствоваться следующими основными принципами:

– непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников излучения (принцип нормирования);

- запрещение всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением (принцип обоснования);

- поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника излучения (принцип оптимизации).

При дозах, характерных для проведения радиационной защиты, возможны два вида эффектов лучевого поражения: соматические (телесные), возникающие в самом облученном организме, и генетические (наследственные), проявляющиеся у потомков в виде различных генетических заболеваний.

Детерминированные (пороговые, соматические) эффекты – эффекты, проявляемые непосредственно в органах и тканях облученного организма и являются клинически выявляемыми. Сопровождаются гибелью большого числа соматических клеток (клеток органов и тканей) под действием больших доз облучения. К детерминированным эффектам относятся: головная боль, тошнота, рвота, диарея, острая и хроническая лучевая болезнь, локальные поражения органов и тканей (например, радиационный ожог, лучевая катаракта). Эффекты проявляются, начиная с некоторого порога (минимальной дозы). Ниже порогового значения соматические эффекты отсутствуют. Тяжесть проявления пороговых эффектов возрастает с увеличением дозы.

Стохастические (генетические) эффекты – это вредные биологические эффекты, вызванные ионизирующим излучением, не имеющие дозового порога возникновения и клинически не выявляемые. К таким эффектам относят онкологические заболевания (радиогенные раки) и наследуемые (генетические) заболевания. Стохастические эффекты облучения проявляются спустя много лет после облучения в виде возникновения различных злокачественных

новообразований и в виде нарушения функционирования некоторых жизненно важных систем организма: сердечно-сосудистой, нервной, иммунной [14].

Таким образом, цель радиационной защиты – предупреждение вредных нестохастических (детерминированных) эффектов и ограничения вероятности появления стохастических эффектов до уровней, считающихся приемлемыми, т.е. до приемлемого уровня профессионального риска смерти $R = (1 \dots 5) \cdot 10^{-4}$.

В соответствии с [21] устанавливаются следующие категории облучаемых лиц:

- персонал – лица, работающие с техногенными источниками ионизирующего излучения (группа А) или работающие на радиационном объекте или на территории его санитарно-защитной зоны и находящиеся в сфере воздействия техногенных источников (группа Б);

- население – все лица, включая персонал вне работы с источниками ионизирующего излучения.

Для студентов и учащихся старше 16 лет, проходящих профессиональное обучение с использованием источников излучения, годовые дозы не должны превышать значений, установленных для персонала группы Б. Предельно допустимая доза для персонала группы Б составляет 5 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 12,5 мЗв в год.

В общем виде в соответствии с [22] можно указать следующие основные принципы техники радиационной безопасности:

1. К работе с радиоактивными веществами и ионизирующими излучениями допускается персонал групп А и Б.

2. Перед началом работы с радиоактивными веществами и ионизирующим излучением в зависимости от технического и научного уровня и характера работ каждый работник должен пройти специальное обучение и сдать соответствующий экзамен по технике радиационной безопасности.

3. Все работы с радиоактивными веществами и ионизирующим излучением должны проводиться в условиях строжайшего соблюдения правил радиационной безопасности при наличии постоянного контроля со стороны

лиц, ответственных за радиационную безопасность в данном учреждении.

4. В помещениях, где проводятся работы с радиоактивными веществами, запрещается хранение пищевых продуктов, табачных изделий, косметики, домашней одежды и других предметов, не имеющих прямого отношения к выполняемым работам.

В работе использовались закрытые, радионуклидные источники фотонного излучения – спектрометрические, эталонные ОСГИ-3. Параметры используемых источников представлены в таблице 27.

Таблица 27 – Параметры используемых в работе источников

	Am ²⁴¹	Eu ¹⁵²	Ba ¹³³	Cd ¹⁰⁹	Co ⁵⁷
Начальная активность, Бк	105000	52000	45000	118000	52000
Дата изготовления	15.10.2014	15.10.2014	20.11.2007	01.10.2014	10.10.2014
Период полураспада, лет	432,808	13,525	10,54	1,267	0,745
Назначенный срок службы, лет	3	12	12	5	5
Дата измерения	15.10.2014	15.10.2014	15.10.2014	15.10.2014	15.10.2014
Активность на момент измерения, Бк	104311	16049	13956	12190	1122

Фотонное излучение включает в себя два вида излучений: рентгеновское (может быть тормозным и характеристическим) и гамма-излучение.

Наиболее распространенным видом фотонного излучения являются обладающие чрезвычайно малой длиной волны гамма-кванты, которые представляют собой поток высокоэнергичных, не обладающих зарядом фотонов. В отличие от альфа- и бета-частиц, гамма-кванты не отклоняются магнитными и электрическими полями и обладают значительно большей проникающей способностью. Препятствовать распространению потока гамма-

квантов могут только такие тяжелые химические элементы, как, например, свинец, обедненный уран и вольфрам.

Радиоактивные изотопы, находящиеся в закрытом (герметизированном) виде, создают опасность только внешнего облучения персонала. Поэтому техника радиационной безопасности в этом случае сводится к следующему:

- надлежащему экранированию радиоизотопного источника ионизирующего излучения;
- сокращению работы с ним;
- использованию дистанционных манипуляционных инструментов в случае необходимости проведения каких-либо перемещения источника.

В лаборатории осуществляется личный и общий дозиметрический контроль, для чего во всех помещениях, где это нужно, устанавливаются стационарные и переносные дозиметрические приборы. Для проведения общего дозиметрического контроля в лаборатории специально выделяется ответственное лицо.

Все места, в которых ведутся радиоактивные работы, должны быть отмечены знаками радиационной опасности. Персонал, работающий с радиоактивными источниками, обязан обеспечивать надежную защиту от облучения для окружающих [22].

10.4 Электробезопасность

Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ и другими электроустановками и приборами в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%),

высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами.

Также в работе использовали: паяльную станцию, цифровой осциллограф и генератор импульсов.

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Электрический ток, проходя через тело человека, оказывает тепловое, химическое и биологическое воздействие.

Тепловое (термическое) действие проявляется в виде ожогов участка кожи, перегрева различных органов, а также возникающих в результате перегрева разрывов кровеносных сосудов и нервных волокон.

Химическое (электролитическое) действие ведет к электролизу крови и других содержащихся в организме человека растворов, что приводит к изменению их физико-химических составов, а значит, и к нарушению нормального функционирования организма.

Биологическое действие проявляется в опасном возбуждении живых клеток и тканей организма, в результате чего они могут погибнуть.

Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока зависит от:

- параметров электрического тока, протекающего через тело человека (величины напряжения, частоты, рода тока приложенного к телу);
- пути тока через тело человека (рука-рука, рука-нога, нога-нога, шея-ноги и др.);
- продолжительность воздействия тока через тело человека;
- условий внешней среды (влажности и температуры);
- состояния организма человека (толщины и влажности кожного покрова, состояния здоровья и возраста).

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов установлены для путей тока от одной руки к другой и от руки к ногам.

Напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не должны превышать значений, указанных в таблице 28.

Таблица 28 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

Род тока	U, В	I, мА
	Не более	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4
Постоянный	8,0	1,0

Для контроля предельно допустимых значений напряжений прикосновения и токов измеряют напряжения и токи в местах, где может произойти замыкание электрической цепи через тело человека. [19]

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной

изоляции;

- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпус электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей);

- применение средств защиты.

К средствам индивидуальной защиты от поражения электрическим током относятся:

- оградительные устройства, которые могут быть стационарными и переносимыми. Ограждения могут быть сблокированы с устройствами, отключающими рабочее напряжение при снятии;

- изолирующие устройства и покрытия;

- устройства защитного заземления, зануления и защитного отключения;

- устройства дистанционного управления;

- предохранительные устройства и др.

10.5 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [23], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины возгорания:

- неисправность токоведущих частей установок;

- работа с открытой электроаппаратурой;

- короткие замыкания в блоке питания;

- несоблюдение правил пожарной безопасности;

- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция

кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и других причин необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности [24]:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения – предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления,

вентиляции, освещения;

- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

Заключение

В ходе выполнения работы был изготовлен прототип спектрометра, на котором произведены измерения спектров фотонного ионизирующего излучения радионуклидов Am^{241} , Eu^{152} , Ba^{133} , Cd^{109} и Co^{57} . На основе полученных данных была проведена энергетическая градуировка шкалы, определены эффективность регистрации и энергетическое разрешение спектрометра.

В результате исследования была подтверждена возможность применения pin-фотодиодов – приемников оптического излучения для детектирования рентгеновского и низкоэнергетического гамма-излучений. Толщина чувствительной области pin-фотодиода 210 мкм оказалась достаточной для поглощения фотонов с энергией 122 кэВ. Измерение рентгеновского излучения с энергией до 20 кэВ оказалось невозможным из-за высокого уровня низкоамплитудного шума спектрометра, образованного помехами за счет источников питания и другого электронного оборудования, в связи с чем, на аналого-цифровом преобразователе был выставлен высокий порог чувствительности входных импульсов.

Эффективность регистрации гамма-квантов была определена для энергий 59,54 кэВ и 80,997 кэВ, составила $4,7 \cdot 10^{-4}$ (примерно в 8 раз меньше теоретического значения $3,9 \cdot 10^{-3}$ для энергии 60 кэВ) и $1,1 \cdot 10^{-4}$ (примерно в 25 раз меньше теоретического значения $2,8 \cdot 10^{-3}$ для энергии 80 кэВ) соответственно. Причиной таких различий могут служить ошибки в расчете площади пиков, в связи с отклонением их формы от гауссиана и частичного перекрытия соседним пиком на спектре америция.

Полная ширина пика с энергией 59,54 кэВ на половине высоты составила около 11,11 кэВ, что примерно в 32 раза больше ширины распределения выходных импульсов детектора на половине высоты (0,35 кэВ). Для пика с энергией 80,997 кэВ ПШПВ составила 10,9 кэВ, что примерно в 27 раз больше теоретического значения (0,41 кэВ). Такое уширение может быть

обусловлено, шумами полевого транзистора и операционных усилителей, темновым током фотодиода, а также перегрузкой спектрометра по скорости счета импульсов.

Список используемых источников

1. В. В. Кашковский. Специальный физический практикум: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 404 с.
2. Дж. Дирнли, Д. Нортроп. Полупроводниковые счетчики ядерных излучений. – М.: Мир, 1966. – 359 с.
3. В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. Электроника: учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с.
4. С. М. Рывкин, О. А. Матвеев, Н. Б. Строкан. Полупроводниковые счетчики ядерных частиц. – Л.: Об-во «Знание», 1964. – 40 с.
5. Е. А. Тимошенко, М. С. Черепнев, А. Н. Алейник. Разработка спектрометра фотонного ионизирующего излучения на основе pin-фотодиода // Труды пятнадцатой всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов. – Томск, 17-19 мая 2018 г. / под. ред. В.В. Демина. – Томск: Изд-во НТЛ, 2018. – С. 205-208.
6. B. Kainka. Measure Gamma Rays with a Photodiode. Radiation detector using a BPW34 // Elektor Magazine, 2011, № 6, pp. 22-26.
7. Д. Райли, Н. Энслин, Х. Смит, С. Крайнер. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов – М.: Бином, 2000. – 720 с.
8. П. Хоровиц, У. Хилл. Искусство схемотехники: Пер. с англ. – Изд. 6-е – М.: Мир, 2003. – 704 с.
9. Э. И. Кэбин. Ядерная электроника для пользователей [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/electronics/index.html>.
10. BPW34, BPW34S Silicon PIN Photodiode – Vishay [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>.
11. M. A. Khazhmuradov, N. A. Kochnev, D. V. Fedorchenko. PIN Photodiodes For Gamma Radiation Measurements // RadioElectronics & Informatics, 2012, № 4, pp. 74-77.
12. Lund/LBNL Nuclear Data Search [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/>.

13. Б. С. Ишханов, И. М. Капитонов, Э. И. Кэбин. Частицы и ядра. Эксперимент. – М.: Изд-во МАКС Пресс, 2013. – 252 с.
14. В. И. Беспалов. Лекции по радиационной защите: учебное пособие; Томский политехнический университет. – 5-е изд., расшир. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – 695 с.
15. В. И. Арбузов. Основы радиационного оптического материаловедения. – СПб.: СПбГУИТМО, 2008. – 284 с.
16. Н. А. Гаврикова, Л. Р. Тухватулина, И. Г. Видяев, Г. Н. Серикова. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 73 с.
17. «Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019).
18. СанПин 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
19. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
20. ТИ Р М-075-2003 межотраслевая типовая инструкция по охране труда для работников, занятых пайкой и лужением изделий паяльником.
21. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009».
22. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010 N 40 (ред. от 16.09.2013) «Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)»
23. Постановление Правительства РФ от 25.04.2012 № 390 «О противопожарном режиме» (ред. от 07.03.2019).
24. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

Приложение А
(справочное)

Development of a photon radiation spectrometer based on a pin photodiode

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM74	Тимошенко Е. А.		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ	Яковлева В. С.	д.т.н.		

Консультант-лингвист Отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Преподаватель	Шайкина О. И.	-		

Contents

1 Radiation detectors.....	104
1.1 Semiconductor detectors.....	104
1.1.1 Semiconductors properties.....	104
1.1.2 Ionization and charge collection.....	107
1.1.3 Main types of semiconductor detectors.....	108
1.1.4 Pin photodiode.....	109
2 Preamplifier.....	110
3 Amplifier.....	111
3.1 Noise filtering.....	111
3.2 Amplifier with the shaping of a quasi-Gaussian signal.....	112
References.....	115

1 Radiation detector

A detector is a part of a spectrometric system in which radiation energy is absorbed and transformed, leading to the appearance of a signal. The radiation from the source enters the detector volume, interacts with the sensitive area and loses some or all of its energy in it. As a result of energy absorption in the volume of the detector, its state changes, which leads to the appearance of an electrical signal. This signal is amplified and recorded in special devices (Figure 1).

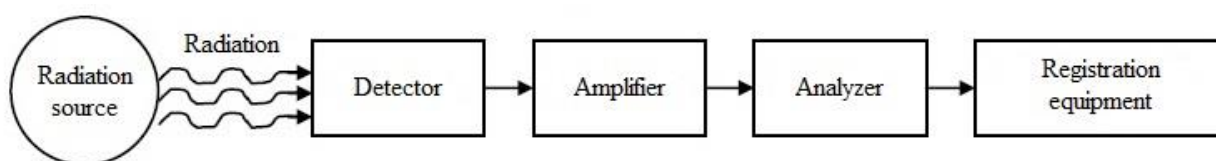


Figure 1 – Functional diagram of the experiment [1]

Usually, radiation detection methods are based on the processes of ionization or excitation of atoms of the detector substance during the passage of charged particles. Neutral particles and electromagnetic radiation must first experience interaction with the substance of the detector or with the converter adjacent to the detector so that charged particles can be formed that cause ionization [2].

1.1 Semiconductor detectors

1.1.1 Semiconductor properties

Semiconductors include materials that have a resistivity at room temperature from 10^{-5} to 10^{10} ohm·m. The most commonly used silicon, gallium arsenide, selenium, germanium, tellurium, various oxides, sulfides, nitrides and carbides [3].

Energy bands in semiconductors are formed from the allowed electron energy levels of individual atoms that make up the crystal lattice. At an isolated atom, the energy levels are discrete, when the atoms approach each other, forming a crystal lattice, the atomic energy levels are split in accordance with the distance between the

atoms, as well as in accordance with the size and nature of the electric field caused by atomic nuclei. The discrete energy levels of isolated atoms are split into bands, each of which is not localized, but refers to the entire crystal.

Semiconductors and dielectrics have the property that at absolute zero temperature, when the electrons fill the lowest free energy levels, one or more energy bands must be completely filled. The highest filled band is separated from the next higher band by a forbidden energy gap of width E_g , in which there are no allowed levels. This is the basis of the energy band diagram presented in Figure 2, which shows the highest filled (or valence) band and the lowest free band (or conduction band), separated by the forbidden band E_g .

As for an isolated atom, the allowed energy values are closely related to the allowed values of the momentum (wave vector).

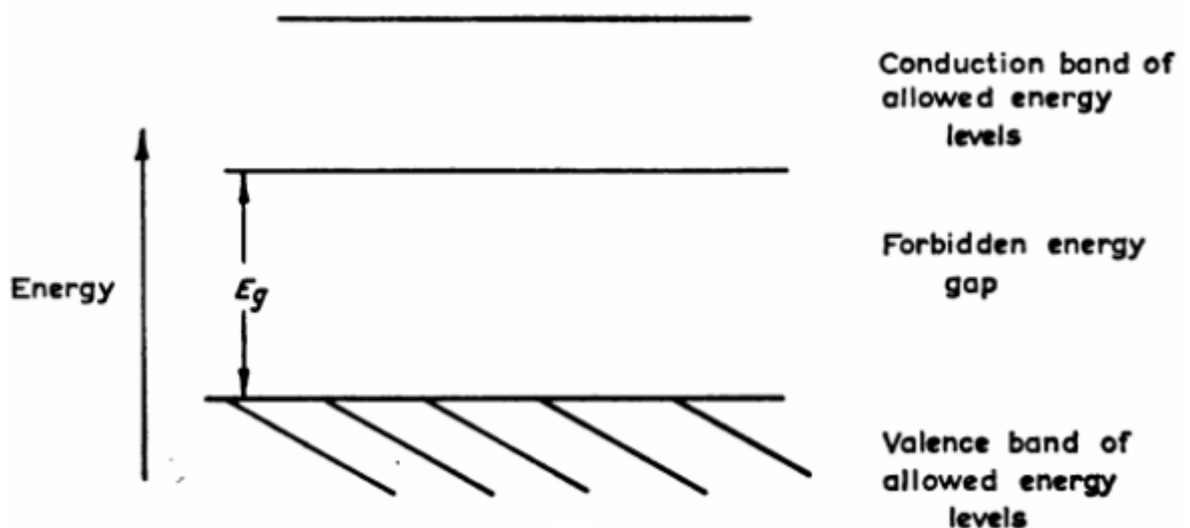


Figure 2 - Diagram of the energy bands of a semiconductor

At absolute zero, there is no conductivity, since there are no electrons in the conduction band, and the valence band is completely filled. This means that any change in the wave vector of one of the electrons must be accompanied by an equal and opposite in sign change in the wave vector of the other electron, i.e., the total wave vector of electrons in the occupied bands is always zero. At higher temperatures, electrons can transfer from the valence band to the conduction band as

a result of thermal excitation. At equilibrium, these electrons are balanced by other electrons falling back onto the free levels of the valence band.

Under normal conditions, both the conduction band and the valence band are partially filled. Therefore, when an electric field is applied to a crystal, the energies and wave vectors of electrons in each band change. As a rule, the conduction band is relatively small filled with electrons, which move almost independently of each other. This means that the valence band is almost full.

In intrinsic semiconductors, the electron concentration n is equal to the hole concentration p . The mobilities of electrons and holes have the same physical meaning as the mobilities of electrons and ions produced by a gas discharge, i.e. they represent the average drift velocity in the direction of a single electric field, provided that on average the energy received by carriers from the electric field, is lost due to scattering processes in the crystal lattice.

Impurities or imperfections of the lattice structure create localized energy levels, which are usually located in the forbidden zone. Localized centers can be ionized, either by donating electrons to the conduction band (donors), or by taking electrons from the valence band (acceptors). The energy required for this is less than the forbidden gap E_g . In any of these processes, only one free charge carrier arises; therefore, the equality between the electron and hole concentrations is violated. Such semiconductors are called impurity. The concentration of free charge carriers at any temperature now depends on the concentration of impurities and their activation energy.

At thermal equilibrium, a semiconductor is characterized by a certain concentration of electrons and holes, the velocities of which are distributed in accordance with the lattice temperature, and are generally electrically neutral. Under the action of light or ionizing particles, a certain number of non-equilibrium carriers appear, recombining with charge carriers of a different sign, and their concentration decreases exponentially, tending to an equilibrium value.

1.1.2 Ionization and charge collection

A particle in a semiconductor crystal slows down almost instantaneously (in most cases from 10^{-12} to 10^{-11} seconds), losing almost all of its energy to the formation of low-energy electrons by impact ionization. Gamma rays lose their energy in a different way. As a result of the photoelectric effect, the Compton effect or the production of electron-positron pairs, they form a fast electron when interacting, which can then be considered as the primary bombarding particle, although it does not fall on the surface of the detector. In turn, the secondary electrons very quickly lose their energy due to further impact ionization, until their remaining kinetic energy becomes too small to form an electron-hole pair. These ionization acts can be considered as elastic collisions of “billiard balls”, in which energy and momentum are conserved. Consequently, although the threshold photon energy required for the formation of an electron-hole pair is equal to E_g (width of the forbidden gap), the threshold energy of impact ionization will be larger and usually is about $1.5E_g$ if the electron and hole masses are the same. If they are not the same, then this energy will be much larger. For silicon, the average energy consumed for the formation of an electron-hole pair is 3.6 eV, the forbidden gap of silicon at room temperature is 1.15 eV.

The signal used to register a particle and change its energy is due to the separation of electron-hole pairs near the particle track and the collection of charge carriers on the detector electrodes. First, the applied electric field begins to separate the positive and negative charges. However, since the ionization column is polarized, a space charge field of opposite sign arises, which can be completely neutralized by the applied electric field in the center of the column. In this case, near the center of the ionization column, charge separation continues due to the usual bipolar diffusion, and the applied field continues to separate the charges at its edges. Finally, due to diffusion, the diameter of the ionization column increases so much that an applied electric field can penetrate into it again. At this stage, the charge separation process

ends and charge collection begins, with each carrier being attracted to the corresponding electrode by a full applied field [2].

1.1.3 Main types of semiconductor detectors

Currently, there are three types of semiconductor detectors suitable for ionizing radiation spectrometry. They differ in the method of obtaining the p-n junction, characteristics and their purpose.

The first type – surface barrier detectors — is obtained by creating a p-n barrier directly on the semiconductor surface, has a very thin “window” and a relatively narrow sensitive area, and therefore is used mainly for spectrometry of particles with low mileage in silicon.

The second type is diffusion p-n detectors, in which a p-n junction is created by diffusion of the corresponding impurities into a semiconductor wafer of p- or n-type conductivity. The resulting surface layer of a different conductivity type is in essence the “window” of the detector. Unfortunately, these layers are much thicker than that of surface barrier detectors, but the sensitive area of such detectors is somewhat wider due to the higher resistivity of p-type silicon. Due to these reasons, diffusion detectors should be used for spectrometry of particles with low specific ionization, but low energies.

The third type – diffusion-drift p-i-n detectors, are prepared on the basis of the so-called p-i-n structure, in which i is a region (area with its own conductivity), being a high resistance, serves as a sensitive area of the detector. The width of the sensitive layer in such detectors reaches several millimeters. As with diffusion detectors, either the p- or n-region serves as a “window”. Such detectors are suitable for spectrometry of particles with large ranges and photons [4].

1.1.4 Pin photodiode

A pin photodiode is an optical radiation receiver having a semiconductor structure, which includes a region of positive charges (p), a region of negative charges (n) and separating their neutral region (i) depleted of charge carriers (Figure 3).

The photons pass into the detector through the input window. As a result of the interaction of photons with the sensitive region of the detector crystal, electron-hole pairs are formed in it, the number of which depends on the photon energy. Under the action of an external electric field, the pairs are separated and move in the opposite direction to their electrodes, as a result of which an electric current is formed. The signal received from the detector is then amplified and transformed in the form of a preamplifier and amplifier-shaper, and digitized by amplitude analyzer.

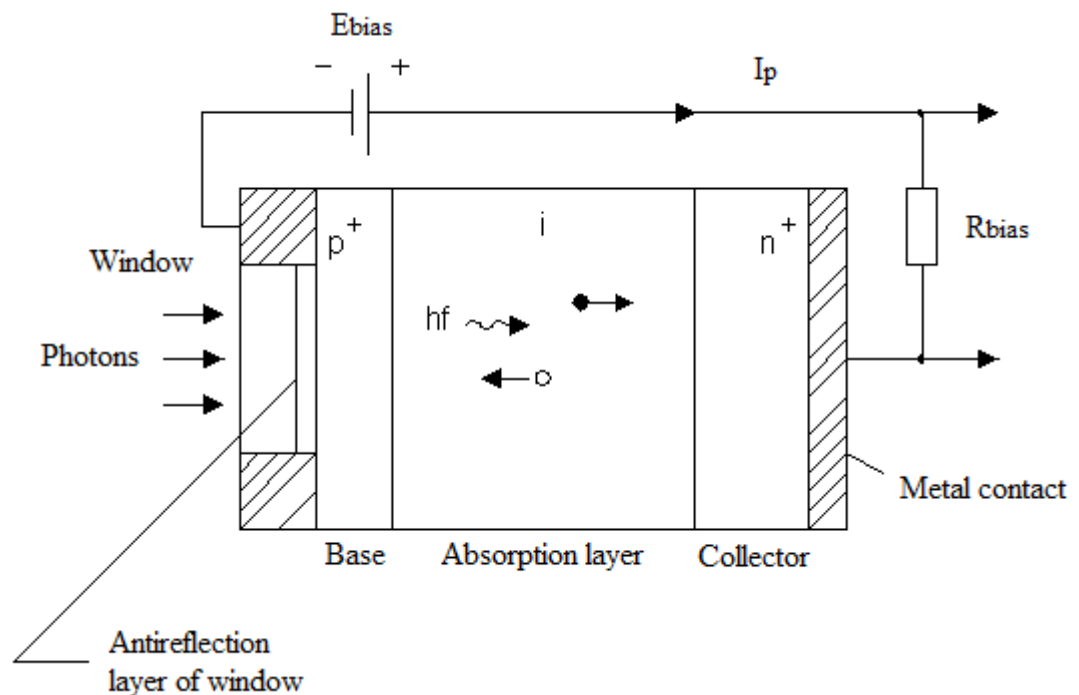


Figure 3 – Pin photodiode structure

For the registration of x-ray and low-energy gamma-radiation, it is possible to use non-specialized, low-cost pin-photodiodes intended for operation in the visible and infrared ranges of photon radiation.

To increase the sensitivity of the detecting system to ionizing radiation, a reverse bias voltage E_{bias} is applied to the photodiode, under the action of which the depletion region is expanded. This contributes to the formation of a larger number of electron-hole pairs per photon. In addition, an increase in the thickness of the sensitive layer reduces the detector capacitance and increases the signal-to-noise ratio [5].

The main requirement for the use of a photodiode as a detector of ionizing radiation is the complete elimination of light exposure, because otherwise the photocurrent will excessively flood the desired signal [6].

2 Preamplifier

A preamplifier converts a current pulse into a voltage pulse, the amplitude of which is proportional to the energy lost by gamma radiation in the process of interaction with the detector. The output of the detector is usually a short time current pulse with a low amplitude. So for pulsed ionization chambers and semiconductor detectors, it ranges from units to hundreds of microvolts [7].

Field-effect transistors are commonly used in the input circuits of preamps. High impedance input and almost zero constant gate current allows amplifying signals of small amplitude [8].

In order to obtain the maximum signal-to-noise ratio and to store information regarding the energy of gamma radiation, the preamplifier should be placed as close as possible to the detector. The proximity of the preamp minimizes the input capacitance of the preamp, thereby reducing the input noise level [7].

Germanium gamma detectors and silicon X-ray detectors usually have a galvanic coupling (DC coupling) with preamplifiers. In charged particle detectors, the signal is usually taken through a capacitive coupling from an electrode to which a bias voltage is applied. This allows you to ground one of the detector pins. Capacitive coupling is also used for detectors with high leakage currents [9].

3 Amplifier

The amplifier is designed to amplify low-voltage pulses from the preamp to the values required for operation of the amplitude analyzer, which is located behind the main amplifier. The voltage range at the output of the amplifier is usually from 0 to 10 V. The gain can be set in a wide range: from 10 to 5000.

Amplified pulses are converted in shape to optimize the signal-to-noise ratio and meet the requirements of the amplitude-pulse analyzer [7].

For amplitude analysis it is important to ensure a good signal-to-noise ratio, since it determines the energy resolution of the spectrometer. Since the noise sources in the detector and the first amplifier stages have a wider frequency band than the useful information band, the signal-to-noise ratio can be improved by appropriate filtering. The optimal energy resolution requires fairly long pulses, however, at high speeds of event registration, in order to minimize impositions of the pulses, they should be, on the contrary, short. In addition, it is often necessary to save and temporary information, and this is due to a fairly wide bandwidth. The optimal solution is often the result of a compromise. Modern linear amplifiers allow operation at loads up to $\sim 7000 \text{ s}^{-1}$ without deterioration of the resolution and up to $\sim 90000 \text{ s}^{-1}$ with a slight deterioration.

3.1 Noise filtering

A simple differentiating CR circuit is a high-pass filter (the low-frequency components of the signal are attenuated). The integrating RC circuit is a low-pass filter (its high-frequency signal components are attenuated). Usually, the time constants of differentiating τ_d and integrating τ_i circuits are chosen the same $\tau_d = \tau_i = \tau$. Figure 4 shows the output waveform after the CR-RC filter.

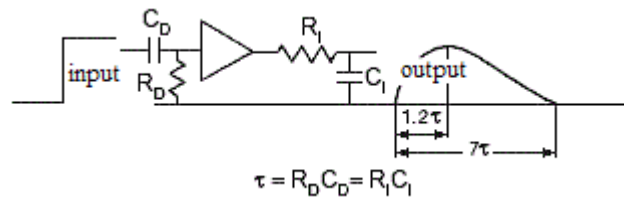


Figure 4 – CR-RC filter

The components of the total noise have different spectral distributions. For some, the spectral density increases with increasing frequency, for others, on the contrary, decreases, for the third – it is constant. The minimum noise is achieved at a time constant CR-RC filter τ , when the contributions, depending on the frequency of the components, are equal (Figure 5).

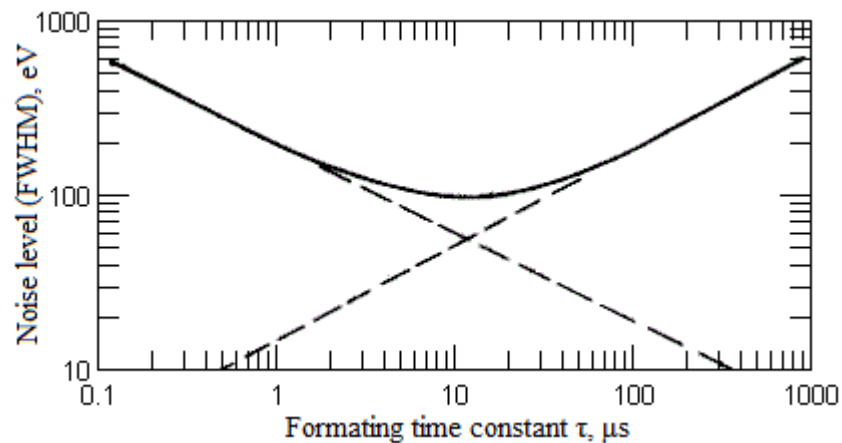


Figure 5 - The dependence of the noise contribution from the time constant of the amplifier

The optimal time constant depends on the characteristics of the detector, preamplifier, and formed amplifier circuits. For silicon detectors of charged particles, the optimal time constant is 0.5-1 μ s. For germanium and silicon photon detectors, it is noticeably larger (6-20 μ s).



3.2 Amplifier with the shaping of a quasi-Gaussian signal

The signal of quasi-Gaussian shape can be obtained by a single differentiation and multiple integration: $CR + (RC)^n$. With an increase in the number of integrations,

the signal becomes more and more symmetrical bell-shaped, close to the Gauss curve.

Table 1 shows the comparative characteristics of the noise properties of a quasi-Gauss signal shaping signal normalized to the signal-to-noise ratio for a theoretically optimal filter that has exponential leading and falling edges and a point vertex. The analog filter is not implemented by analog shaping.

Table 1 - Relative noise characteristics of the shaping of a quasi-Gaussian signal

Shaping filter	Pulse shape	Coefficient of increase noise-to-signal ratio
Theoretically optimal		1
Shaping of quasi-Gauss signal $CR + (RC)^n$		
$n = 1$		1,36
$n = 2$		1,22
$n = 3$		1,18
$n = \infty$		1,12

In modern amplifiers instead of simple CR-RC circuits use more complex circuits. For integration, so-called active filters are used, made on operational amplifiers (Figure 6). The use of active filters reduces the number of integration sections.

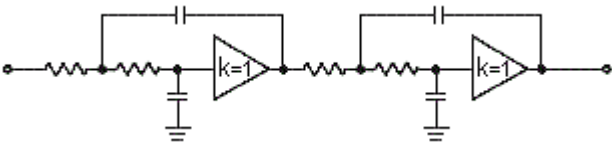


Figure 6 - Simplified diagram of active integrating filters

Figure 7 shows a simplified amplifier circuit with active filters.

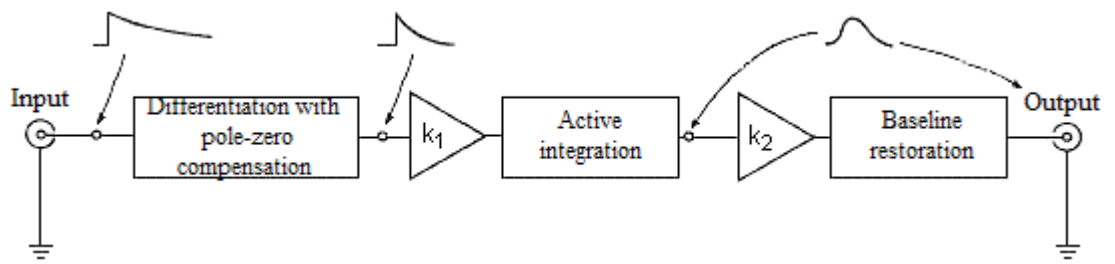


Figure 7 - Simplified amplifier circuit with active filters

Although the spectrometric properties of amplifiers with the shaping of unipolar signals of a quasi-Gaussian shape are close to optimal, usually in they also provide for the possibility of obtaining bipolar signals (Figure 8), in particular, for obtaining temporal information.

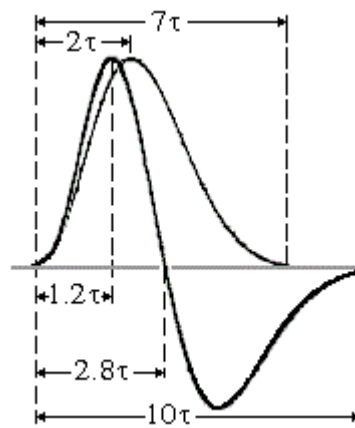


Figure 8 - Output signals of an amplifier with active filters and quasi-Gaussian shaping [9]

References

1. V. V. Kashkovsky. Special physical workshop: study guide. – Tomsk: TPU Publishing House, 2010, p. 404.
2. J. Dearnley, D. Northrop. Semiconductor counters for nuclear radiation. – Moscow: Mir, 1966, p. 359.
3. V. G. Gusev, Yu. M. Gusev. Electronics: a textbook for universities. – 2nd ed., Revised and enlarged – Moscow: Higher School, 1991, p. 622.
4. C. M. Ryvkin, O. A. Matveev, N. B. Strokan. Semiconductor counters of nuclear particles. – Leningrad: Society "Znanie", 1964, p. 40.
5. E. A. Timoshenko, M. S. Cherepnev, A. N. Aleinik. Development of a photon-ionizing radiation spectrometer based on a pin photodiode // Proceedings of the fifteenth all-Russian conference of student research incubators. – Tomsk, May 17-19, 2018 / edited by V. V. Demina. – Tomsk: Publishing house NTL, 2018, pp. 205-208.
6. B. Kainka. Measure Gamma Rays with a Photodiode. Radiation detector using a BPW34 // Elektor Magazine, 2011, № 6, pp. 22-26.
7. D. Riley, N. Enslin, H. Smith, S. Krainer. Passive nondestructive assay of nuclear materials – Moscow: Binom, 2000, p. 720.
8. P. Horowitz, W. Hill. The art of electronics: translation from English. – Ed. 6th – Moscow: Mir, 2003, p. 704.
9. E. I. Cabin. Nuclear electronics for users [Electronic resource] – Access mode: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/electronics/index.html>.

Принципиальная схема спектрометра

